

TUGAS AKHIR - TE 141599

DIAGNOSA KERUSAKAN ISOLASI TRAFU MENGGUNAKAN ANALISA RESPON TEGANGAN UJI SURJA

Muhammad Infaq Dahlan
NRP. 2215 105 016

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph. D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - TE 141599

DIAGNOSA KERUSAKAN ISOLASI TRAFO MENGGUNAKAN ANALISA RESPON TEGANGAN UJI SURJA

Muhammad Infaq Dahlan
NRP. 2215 105 016

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph. D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

***INSULATION DAMAGE DIAGNOSIS ON TRANSFORMER
USING VOLTAGE SURGE TEST ANALYSIS***

Muhammad Infaq Dahlan
NRP. 2215 105 016

Advisor

Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph. D.

***DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017***

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Diagnosa Kerusakan Isolasi Trafo Menggunakan Analisa Respon Tegangan Uji Surja**” adalah benar-benar hasil karya mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017

Muhammad Infaq Dahlan
NRP 2215 105 016

**DIAGNOSA KERUSAKAN ISOLASI TRAFU MENGGUNAKAN
ANALISA RESPON TEGANGAN UJI SURJA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,
21-07-17

Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph. D.
NIP. 19810905 200501 1 002

Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph. D.
NIP. 19731119 200003 1 001



Diagnosa Kerusakan Isolasi Trafo Menggunakan Analisa Respon Tegangan Uji Surja

Nama : Muhammad Infaq Dahlan
Pembimbing I : Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Pembimbing II : Dedet C. Riawan, ST., MEng., Ph. D.

ABSTRAK

Trafo merupakan sebuah alat yang berguna untuk menyalurkan energi antara dua sirkuit melalui induksi elektromagnetik. Energi yang disalurkan adalah energi listrik yang dirubah tegangannya dari tegangan *Alternating current* (AC) satu tingkat ke tingkat tegangan AC tingkat lainnya. Kerusakan trafo banyak disebabkan karena kegagalan isolasi. Untuk mendeteksi kegagalan isolasi pada belitan trafo digunakan berbagai metode salah satunya adalah metode pengujian tegangan surja. Untuk membangkitkan tegangan surja diperlukan rangkaian pembangkit tegangan surja. Cara kerja rangkaian ini adalah membangkitkan tegangan tinggi DC yang kemudian di simpan muatannya didalam kapasitor surja, lalu muatan tersebut akan dilepaskan ke belitan trafo. Tegangan surja yang terbentuk akan dianalisa dengan metode *Error Area Ratio* (EAR). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Test-Ref* EAR, dengan menggunakan standar tegangan maksimum EASA, yaitu dengan nilai $2 \times V_{line} + 1000$. Standar ini akan diaplikasikan pada trafo dengan tegangan primer 220V dan sekunder 127V. Namun pada penelitian ini menggunakan tegangan 1000V dikarenakan peralatan *switch* yang hanya mampu mencapai tegangan maksimum sebesar 1200V. Trafo akan diuji dengan tegangan surja 1000V dalam kondisi normal, sedikit rusak, dan rusak parah dengan cara melakukan *short circuit* yang disengaja pada belitan trafo. Pada penelitian ini didapatkan bahwa nilai EAR yang dihasilkan akan terus naik terhadap presentase *turn fault* yang diberikan namun tidak linier. Begitu pula dengan *zero crossing* yang dihasilkan, yaitu nilainya akan semakin turun terhadap besarnya presentase *turn fault* yang diberikan namun tidak linier.

Kata Kunci : Trafo, *Error Area Ratio* (EAR), *Test-Ref* EAR, *Alternating current* (AC), *short circuit*, Standar EASA, *zero crossing*

Halaman ini sengaja dikosongkan.

Insulation Damage Diagnosis on Transformer Using Voltage Surge Test Analysis

Name : Muhammad Infaq Dahlan
Advisor I : Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Advisor II : Dedet C. Riawan, ST., MEng., Ph. D.

ABSTRACT

Transformer is electrical equipment that use to distributed energy between two circuits through electromagnetic induction. The energy that distributed is alternating current (AC) in different voltage level. The damage of transformer is due to failure. To detect isolation failure on winding transformer used various method, one of them is surge voltage test method. This method's work is to generate a DC high voltage, and then charged the surge capacitor. After that the voltage will be released to the winding transformer. The surge voltage formed will be analyzed by the Error Area Ratio (EAR) method. The method that used in this project is Test-Ref EAR, using EASA standard maximum voltage, with value $2 \times V_{line} + 1000$. This standard will be applied to the transformer with 220V and 127V primary voltages. But in this study using 1000V. This is cause the switch that used just able achieve 1200V. The transformer will be tested with surge voltage, 1000V in a normal condition, a little damage, and severely damage. In this final project, the result is the value of EAR will be increased to the percentage of turn fault (but not liner). Similarly, the value of zero crossing will be decrease to the percentage of turn fault (but not linear to).

Keywords : Transformer, Error Area Ratio (EAR), Test-Ref EAR, Alternating current (AC), short circuit, EASA standard, zero crossing

Halaman ini sengaja dikosongkan.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat-Nya penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir Penulis yang berjudul : **“Diagnosa Kerusakan Isolasi Trafo Menggunakan Analisa Respon Tegangan Uji Surja”** secara tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana di Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Sehingga penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Hj. Liswatin, selaku ibunda dari penulis yang selalu memberikan motivasi dan do'a kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan secara tepat waktu.
2. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng sebagai Ketua Departemen Teknik Elektro – Fakultas Teknologi Elektro - Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
3. Bapak Dimas Anton Asfani, ST., MT. Ph.D. sebagai Dosen Pembimbing I Tugas Akhir.
4. Bapak Dedet C. Riawan, ST. M.Eng. Ph. D. sebagai Dosen Pembimbing II Tugas Akhir.
5. Seluruh Asisten Laboratorium Tegangan Tinggi ITS- Surabaya.
6. Keluarga El'16 yang selalu memberikan semangat dan inspirasi kepada penulis.
7. Keluarga Kontrakan HS yang selalu mengayomi penulis.

Penulis berharap Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis dan pembaca.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Batasan masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Metodologi.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	5
1.7 Relevansi.....	6
BAB 2 TRAFO, TES SURJA, DAN PEMBANGKIT TEGANGAN TINGGI DC.....	7
2.1 Trafo	7
2.2 Kegagalan Isolasi Pada Belitan Trafo	9
2.3 Tes Surja	10
2.4 Standar Tegangan Uji Surja	11
2.5 Distribusi tegangan pada kumparan dengan inti besi	12
2.6 Metode <i>Error Area Ratio</i> (EAR)	12
2.6.1 P-P EAR	13
2.6.2 L-L EAR	15
2.6.3 <i>Test-Ref</i> EAR.....	15
2.7 Pembangkit Tegangan Tinggi DC	15
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM DAN ALAT	17
3.1 Konfigurasi Sistem	17
3.2 Perancangan <i>Hardware</i>	18
3.2.1 Pembangkit Tegangan Tinggi DC.....	18
3.2.2 Rangkaian <i>Switching</i>	20
3.2.3 Rangkaian Kapasitor Surja	22
3.2.4 Verivolt	23
3.2.5 Sensor Tegangan NI-9223.....	23

3.3 Perancangan <i>Software</i>	23
3.3.1 Perancangan Program Arduino.....	23
3.3.2 Perancangan Program Lab VIEW	24
3.4 Perancangan Trafo	24
BAB 4 DETEKSI KERUSAKAN ISOLASI TRAF0	
MENGUNAKAN UJI SURJA	29
4.1 Pengukuran Belitan Trafo	29
4.2 Hasil dan Analisis Pengujian Pembangkit Tegangan Tinggi DC .	30
4.3 Hasil dan Analisis <i>Switching</i> Gelombang Surja	32
4.4 Hasil dan Analisis Pengujian Gelombang Surja	33
4.4.1 Hasil <i>rise time</i> Gelombang Surja	34
4.4.2 Hasil dan Analisis Bentuk Gelombang Surja	35
4.5 Hasil Tes Surja, EAR, dan <i>Zero Crossing</i> Pada Trafo	36
4.5.1 Cara Mencari Gelombang Referensi	37
4.5.2 Hasil Tes Surja Pada Trafo.....	38
4.6 Pembongkaran Kembali Trafo	48
BAB 5 PENUTUP	51
5.1 Kesimpulan	51
5.2 Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN A	55
LISTING PROGRAM	55
1. <i>Program Arduino</i>	55
2. <i>Program Lab VIEW</i>	56
LAMPIRAN B	56
DATASHEET	57
1. <i>Datasheet reed relay</i>	57
2. <i>Datasheet IGBT</i>	58
RIWAYAT HIDUP	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Metode penelitian	3
Gambar 2.1 Cara kerja trafo	8
Gambar 2.2 Kerusakan belitan pada trafo	9
Gambar 2.3 Rangkaian ekuivalen tes surja	10
Gambar 2.4 Gelombang surja referensi dan pengujian	13
Gambar 2.5 Pengolahan gelombang dengan persamaan 2.4	14
Gambar 2.6 Pengolahan gelombang dengan persamaan 2.5	14
Gambar 2.7 Rangkaian <i>single secondary winding villard cascade</i>	16
Gambar 3.1 Konfigurasi sistem surja	17
Gambar 3.2 Desain pembangkit tegangan tinggi DC	19
Gambar 3.3 Implementasi <i>single secondary winding villard cascade</i> ..	19
Gambar 3.4 Skema rangkaian <i>switching</i>	21
Gambar 3.5 Implementasi rangkaian <i>switching</i>	21
Gambar 3.6 Arduino	22
Gambar 3.7 Implementasi rangkaian kapasitor surja	23
Gambar 3.8 Verivolt	23
Gambar 3.9 NI-9223	24
Gambar 3.10 Trafo dengan <i>external tab</i>	26
Gambar 3.11 Kumparan trafo primer dan sekunder	26
Gambar 3.12 Skema <i>turn</i> yang dihubungkan dengan <i>external tab</i> pada trafo	27
Gambar 4.1 Resistansi belitan trafo primer dan sekunder	29
Gambar 4.2 Induktansi belitan trafo primer dan sekunder	30
Gambar 4.3 <i>Setup</i> pembangkit tegangan tinggi DC	31
Gambar 4.4 Hasil pengujian tegangan DC menggunakan rangkaian <i>single secondary winding villard cascade</i>	32
Gambar 4.5 Bentuk gelombang tegangan surja	32
Gambar 4.6 <i>Reed relay</i> dengan dioda	33
Gambar 4.7 <i>Setup</i> pengambilan data tes surja	33
Gambar 4.8 <i>Rise time</i> tegangan surja pada belitan primer trafo	34
Gambar 4.9 <i>Rise time</i> tegangan surja pada belitan sekunder trafo	35
Gambar 4.10 Gelombang surja trafo primer dan sekunder	35
Gambar 4.11 Gelombang surja belitan primer	40
Gambar 4.12 Gelombang surja belitan sekunder	41
Gambar 4.13 EAR belitan primer	42
Gambar 4.14 EAR belitan sekunder	43
Gambar 4.15 Variasi 1 EAR belitan primer	44

Gambar 4.16 Variasi 1 EAR belitan sekunder45

Gambar 4.17 *Zero crossing* belitan primer46

Gambar 4.18 *Zero crossing* belitan sekunder47

Gambar 4.19 Belitan trafo sekunder48

Gambar 4.20 Induktansi setelah trafo dibongkar49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Industry test voltage</i>	11
Tabel 2.2 Standar EAR untuk motor.....	15
Tabel 3.1 Spesifikasi <i>reed relay</i>	20
Tabel 3.2 Spesifikasi IGBT	20
Tabel 3.3 Spesifikasi trafo.....	25
Tabel 3.4 Nomor <i>turn</i> yang dikeluarkan ke <i>external tab</i>	25
Tabel 4.1 Hasil pengujian dan perhitungan pembangkit tegangan tinggi DC.....	31
Tabel 4.2 <i>Rise time</i> hasil pengujian	34
Tabel 4.3 Persentase variasi <i>short circuit</i>	36
Tabel 4.4 Nilai EAR gelombang referensi.....	37

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Trafo merupakan sebuah alat yang berguna untuk menyalurkan energi antara dua sirkuit melalui induksi elektromagnetik. Energi yang disalurkan adalah energi listrik yang dirubah tegangannya dari tegangan *Alternating current* (AC) satu tingkat ke tingkat tegangan AC tingkat lainnya, dalam penyediaan kebutuhan tingkat tegangan suatu peralatan tertentu. Dalam tegangan tinggi, trafo banyak digunakan untuk saluran transmisi dan saluran distribusi. Karena penyaluran energi listrik dari grid menggunakan tegangan AC maka untuk peralatan elektronika yang menggunakan tegangan DC, umumnya perlu menurunkan tegangan AC sumber dahulu sebelum masuk ke rangkaian elektronika.

Kerusakan trafo tentu akan menyebabkan terputusnya aliran listrik yang berakibat matinya peralatan listrik. Kerusakan trafo untuk peralatan rumah tangga memang tidak terlalu merugikan, namun untuk kebutuhan industri pasti sangat merugikan.

Biaya perbaikan kerusakan trafo bisa sangat mahal. Pada artikel internasional tentang kerusakan trafo, penyebab terbanyak adalah kegagalan isolasi yang termasuk pemasangan yang kurang baik, isolasi yang buruk, dan *short circuit* [1]. Dalam produksinya, jika kerusakan suatu material tertentu dapat ditemukan, maka *life time* dari trafo dapat ditingkatkan. Isolasi adalah bagian penting pada trafo yang berguna untuk mencegah terjadinya *short circuit* antara belitan. Belitan yang terbakar sering berhubungan dengan kerusakan email. *Short circuit* antar belitan mengakibatkan arus yang sangat besar melaluinya dan menyebabkan panas berlebih. 80% kerusakan mesin listrik disebabkan dari kerusakan isolasinya [2].

Sejauh ini pengukuran isolasi trafo menggunakan alat Megger (mega ohm meter) yang dikatakan baik jika resistansinya terus naik selama 10 menit, dan dengan nilai *Polarization index* (PI) diatas 2 [3].

Riset akhir-akhir ini difokuskan untuk mendeteksi kerusakan belitan yang dapat dilakukan seefisien dan secepat mungkin agar bisa lebih menghemat waktu [4]. Salah satu metode yang bisa dilakukan untuk mempercepat *maintenance* trafo adalah dengan uji tegangan surja. Kelebihan uji surja adalah mampu mendeteksi pelemahan isolasi hingga

kerusakan isolasi yang terjadi di mesin listrik dari belitan bertegangan tinggi hingga belitan bertegangan rendah.

Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian surja untuk mendeteksi kerusakan isolasi pada belitan trafo dari kerusakan yang kecil sampai kerusakan yang parah. Untuk analisa pengujian surja menggunakan metode *Error Area Ratio* (EAR) sehingga didapatkan diagnosa kondisi trafo yang tepat dan praktis [5].

1.2 Permasalahan

Tegangan uji surja yang digunakan untuk mendiagnosa kerusakan isolasi trafo membutuhkan rangkaian pembangkit tegangan tinggi DC, dalam hal ini rangkaian yang digunakan adalah rangkaian *single secondary winding villard cascade*, yang merupakan pengembangan dari rangkaian *cockroft-walton*. Tegangan tinggi DC yang terbangkit, muatannya akan disimpan pada kapasitor dengan kapasitas dan waktu tertentu, yang kemudian muatan dari kapasitor ini akan di salurkan ke belitan trafo melalui *switch*, dan diharapkan akan terbangkit osilasi yang berbeda-beda saat belitan trafo dalam kondisi normal, sedikit rusak, dan rusak parah.

Gelombang osilasi yang terbangkit akan dianalisa menggunakan metode *Error Area Ratio* (EAR) untuk mengetahui presentase *error* gelombang kerusakan terhadap gelombang normalnya. Untuk mendiagnosa kerusakan isolasi pada belitan trafo, presentase EAR pada belitan trafo mulai dari sedikit rusak sampai rusak parah diharapkan memiliki nilai yang terus naik.

1.3 Batasan masalah

Batasan Masalah dalam tugas akhir ini adalah:

1. Trafo yang digunakan adalah trafo *step-down Dry Transformer* dengan kapasitas 1 kVA, 220 – 127.
2. Tegangan uji surja yang digunakan pada belitan trafo memiliki V_{peak} 1000V.

1.4 Tujuan

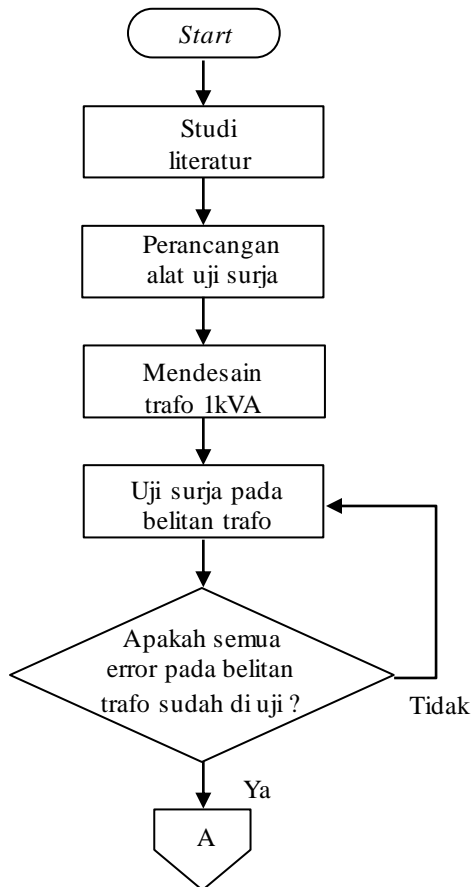
Tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini adalah :

1. Membuat alat uji surja, mulai dari pembangkit tagangan tinggi DC, kapasitor surja, *switch* yang digunakan, program labview dan pengukuran tegangan uji surja.

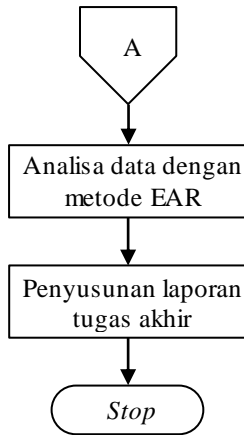
2. Mengetahui gelombang osilasi trafo saat diberi tegangan uji surja dalam kondisi baik, sedikit kerusakan, dan kerusakan yang parah.
3. Mampu mendiagnosa kerusakan trafo dari nilai EAR yang di hasilkan.

1.5 Metodologi

Metode yang digunakan dalam tugas akhir, dapat digambarkan melalui diagram alur berikut ini:



Gambar 1.1 Metode penelitian



Gambar 1.1 Metode penelitian (lanjutan)

1. Persiapan dan Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan teori penunjang berupa buku, jurnal atau paper yang berhubungan dengan tugas akhir. Teori-teori penunjang seperti rangkaian *single secondary winding villard cascade*, metode EAR, dan standar uji surja pada mesin listrik.

2. Perancangan alat uji surja

Perancangan alat uji surja mulai dari pembangkit tegangan tinggi DC dengan rangkaian *single secondary winding villard cascade*, kapasitor surja, switch, alat ukur gelombang surja, dan *Labview*.

3. Mendesain trafo 1kVA

Menentukan desain trafo yang akan didiagnosa kerusakannya menggunakan respon tegangan uji surja. Selain kapasitas dan tegangan, trafo yang akan diuji harus diketahui nomor belitannya.

4. Uji surja pada belitan trafo

Memberikan tegangan surja pada belitan trafo tanpa melepas belitannya. Tegangan surja ini akan diberikan pada belitan trafo primer 220 V dan sekunder 127 V dengan semua variasi error.

5. Analisa data dengan metode EAR

Membandingkan respon gelombang belitan trafo saat kondisi normal, sedikit rusak, dan rusak parah dengan metode EAR.

6. Penyusunan laporan tugas akhir

Penyusunan laporan dilakukan dari awal melakukan studi literatur hingga analisis data serta mendapat kesimpulan mengenai besarnya EAR untuk mendiagnosa kerusakan trafo.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab, dengan uraian sebagai berikut:

BAB 1 : Pendahuluan

Bagian ini membahas dasar-dasar penyusunan tugas akhir, meliputi latar belakang, permasalahan yang diangkat, tujuan yang diharapkan, batasan masalah, metodologi pembuatan Tugas Akhir, sistematika dan relevansi penyusunan laporan Tugas Akhir ini.

BAB 2 : Trafo, Tes Surja, dan Pembangkit Tegangan Tinggi Dc

Bagian ini membahas teori-teori penunjang yang melandasi tugas akhir ini, seperti pengertian tegangan uji surja, peralatan yang digunakan dalam pembangkitan tegangan surja, metode *Error Area Ratio* (EAR) untuk menganalisa gelombang, serta pengontrolan switch dan pengukurannya.

BAB 3 : Perancangan Sistem dan Alat

Bagian ini berisi desain pembuatan alat pembangkitan tegangan uji surja, desain trafo yang digunakan sebagai objek penelitian, serta alat ukur yang digunakan.

BAB 4 : Diagnosa Kerusakan Isolasi Belitan Trafo

Bagian ini membahas mengenai pengujian tegangan surja pada belitan trafo, pengambilan, dan pengolahan data respon gelombang osilasi yang dihasilkan, dan analisa EAR

BAB 5 : Penutup

Bagian ini membahas kesimpulan dari EAR yang dihasilkan dari uji tegangan surja pada belitan trafo berdasarkan kerusakan yang ada. Selain itu juga dilampirkan saran yang diharapkan mampu memberikan perbaikan serta penyempurnaan terkait keberlanjutan tugas akhir ini.

1.7 Relevansi

1. Untuk industri

Tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi industri yang bergerak dibidang pembuatan dan perbaikan trafo untuk mengecek dan mengetahui keadaan isolasi belitan trafo.

2. Untuk bidang ilmu pengetahuan

Sebagai penelitian lebih lanjut mengenai diagnosa kerusakan isolasi belitan trafo berdasarkan respon tegangan uji surja menggunakan metode *Error Area Ratio* (EAR).

BAB 2

TRAFO, TES SURJA, DAN PEMBANGKIT TEGANGAN TINGGI DC

2.1 Trafo

Trafo merupakan peralatan yang digunakan untuk mengubah tegangan nilai tegangan listrik ke nilai yang lain. Berdasarkan sumbernya, trafo dibagi menjadi 2 jenis yaitu trafo 1 fasa dan trafo 3 fasa. Trafo 3 fasa umumnya digunakan di industri yang menggunakan sumber 3 fasa. Sedangkan trafo 1 fasa umumnya digunakan digunakan pada peralatan rumah tangga yang menggunakan sumber 1 fasa. Berdasarkan jenisnya, trafo dibagi menjadi 2 yaitu *dry type* dan *oil filled*. Trafo *dry type* menggunakan udara sebagai pendingin. Sedangkan pada trafo *oil filled* menggunakan aliran minyak yang melewati belitan untuk menghilangkan panas.

Input trafo pada belitan primer, sedangkan outputnya pada belitan sekunder. Jika jumlah belitan primer lebih banyak dari belitan sekunder, maka tegangan input akan lebih besar dari tegangan outputnya, begitu pula sebaliknya.

Cara kerja trafo yaitu dengan mengalirkan arus AC (*Alternating Current*) ke kumparan primer sehingga akan membentuk medan magnet disekeliling kumparan. Semakin besar arus yang mengalir, maka akan semakin besar pula medan magnet yang dihasilkan. Medan magnet pada kumparan primer akan menuju kumparan sekunder melalui *core* yang umumnya terbuat dari besi. Kekuatan medan magnet akan cepat hilang saat diudara atau tanpa *core* daripada menggunakan *core* tertentu. Saat belitan sekunder dialiri medan magnet yang berubah terhadap waktu, maka tegangan akan muncul pada belitan sekunder seperti pada Gambar 2.1 .

Trafo umumnya menggunakan dua kumparan yang disebut juga *insulating transformers*. Kumparan primer dan kumparan sekunder dipisahkan atau tidak terhubung. Sedangkan *autotransformer* menggunakan satu kumparan sehingga kumparan primer dan kumparan sekundernya terhubung secara *interconnected*. Untuk menaikkan atau menurunkan tegangan pada sisi sekunder, maka tap pada kumparan sekunder perlu di rubah posisinya sampai didapatkan nilai tegangan output yang diinginkan.

Control transformers adalah *insulating transformers* yang berjenis *dry type* dan umumnya digunakan sebagai sumber pengontrol peralatan dan *motor starters*. *Control transformer* digunakan jika rangkaian pengontrol membutuhkan *supply* yang berbeda dari sumber. Rangkaian pengontrol umumnya membutuhkan sumber tegangan 24 V dan 120 V. Tegangan 120 V digunakan untuk mengontrol *star-stop push-button* yang mungkin diaplikasikan pada motor 125 hp, 480 V, 3 fasa sebagai pompa irigasi. Jadi *control transformers* akan menurunkan tegangan 480 V ke 120 V untuk rangkaian pengontrol [6].

Pada trafo terdapat empat faktor yang mempengaruhi besarnya induktansi. keempat faktor tersebut adalah jumlah belitan, luas area belitan, panjang belitan, dan jenis *core* yang digunakan sesuai persamaan 2.1 berikut [7] :

$$L = \frac{N^2 \mu_r \mu_0 A}{l} \quad (2.1)$$

Dimana :

L = Induktansi belitan (H)

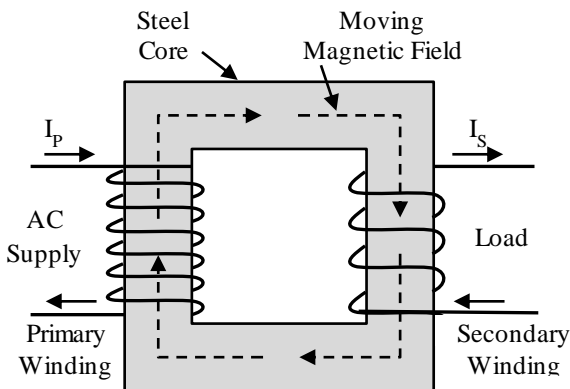
N = Jumlah belitan

μ_r = Permeabilitas *core*. *core* udara ($\mu_0=1$)

$\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6}$ T permeabilitas pada celah udara (m/At)

A = Luas area pada belitan (m²)

l = Panjang rata-rata belitan (m)



Gambar 2.1 Cara kerja trafo

2.2 Kegagalan Isolasi Pada Belitan Trafo

Kumparan adalah bagian penting dari trafo. Pada trafo distribusi umumnya menggunakan dua kumparan, yaitu kumparan primer dan sekunder. Tegangan tinggi dengan arus rendah yang mengalir pada kumparan primer dan melalui induksi elektromagnetik tegangan diturunkan sedangkan arus dinaikkan pada kumparan sekunder. Pada proses ini setiap belitan memiliki batas ketahanan dielektrik, panas, dan mekanik. Kegagalan pada belitan trafo umumnya terjadi karena belitan mengalami *stress* pada proses tersebut, yang menyebabkan belitan *breakdown* atau terbakar. Kegagalan dielektrik pada belitan terjadi karena *breakdown* isolasi antara belitan dalam kumparan. *Breakdown* isolasi terjadi karena arus dan tegangan tinggi yang mengalir diatas nilai rating trafonya, seperti terjadinya sambaran petir tanpa *lighting arrester* dan *fault volteges* yang mengakibatkan *flashover* di belitan dan menyebabkan *short circuit*. Belitan yang biasa digunakan pada trafo adalah tembaga. Sedangkan tembaga memiliki resistansi yang menyebabkan rugi panas. Rugi panas ini akan menimbulkan *hotspot* pada belitan, dan semakin lama kekuatan isolasi belitan pada titik *hotspot* akan menurun dan menyebabkan *breakdown*. Kegagalan mekanik adalah menurunnya kemampuan trafo yang diakibatkan oleh buruknya *maintenance*, korosi, dan getaran [8]. Kerusakan belitan trafo dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Kerusakan belitan pada trafo [9]

2.3 Tes Surja

Prinsip dasar tes surja adalah memberikan arus dengan cepat pada kumparan, sehingga tegangan akan muncul pada kumparan tersebut sesuai persamaan :

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

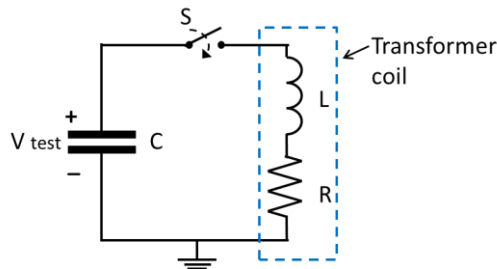
Keterangan :

V = tegangan pada kumparan

L = induktansi kumparan

di/dt = perubahan arus terhadap waktu

Tegangan pada kumparan V adalah tegangan induksi yang terbentuk dari *loop* kumparan. Jika isolasi yang memisahkan antara belitan buruk dan tegangan induksi lebih besar daripada kekuatan dielektrik belitan, maka bunga api listrik akan muncul diantara belitan. Oleh karena itu tes surja dilakukan untuk mendeteksi indikasi terjadinya bunga api listrik pada isolasi belitan yang buruk atau rusak [8].



Gambar 2.3 Rangkaian ekivalen tes surja

Gambar 2.3 diatas, kapasitor akan di *charge* dengan sumber tegangan tertentu. Setelah waktu tertentu, *switch* tegangan tinggi akan menutup dan mengirimkan muatan kapasitor ke kumparan trafo. Jika resistansi pada rangkaian tersebut masih menimbulkan gelombang *under damped*, maka muatan kapasitor akan bergerak melewati kumparan dan menuju sisi lain dari kapasitor dan sebaliknya sampai resistansi belitan mampu menyerap semua muatan kapasitor, sehingga terbentuk gelombang osilasi. Frekuensi dari gelombang osilasi dapat dilihat pada persamaan 2.3 berikut:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}\right)} \quad (2.3)$$

Dikarenakan nilai $\frac{R^2}{4L^2}$ jauh lebih kecil dari pada $\frac{1}{LC}$ maka persamaan dapat direduksi menjadi :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.4)$$

Keterangan :

f = frekuensi

L = induktansi belitan trafo

C = kapasitansi kapasitor surja

R = resistansi total rangkaian

Jika terjadi kegagalan isolasi sehingga terjadi *short circuit* pada belitan, maka nilai induktansi pada rangkaian akan turun. Berdasarkan persamaan 2.4 diatas, turunya induktansi akan meningkatkan frekuensi [10].

2.4 Standar Tegangan Uji Surja

Dalam penerapannya, beberapa industri telah membuat standar untuk tegangan uji surja. Tabel 2.1 berikut menunjukkan tegangan yang direkomendasikan pada beberapa industri [10]. IEEE 522 merekomendasikan tegangan uji 3.5pu (1pu = per unit = $\sqrt{2/3} * V_{Line}$ maksimum ke ground dalam sistem tiga fasa) untuk mendapatkan *rise time* surja sebesar 0.1 μ s. Jadi semakin besar tegangan yang diberikan, maka akan semakin lama pula rise time yang dihasilkan.

Tabel 2.1 *Industry test voltage*

V_{Line}	Per Unit	IEEE 522	EASA	IEC34-15
		New Coils	In Service	1.2 x 50 μ s
		3.5pu	2 x V_{Line} +1000	4 x V_{Line} + 5000
480	392	1372	1960	6920
575	469	1643	2150	7300
600	490	1715	2200	7400
2300	1878	6573	5600	14200
4160	3397	11888	9320	21640

2.5 Distribusi tegangan pada kumparan dengan inti besi

Distribusi tegangan pada belitan tanpa inti atau dengan inti udara hampir linier. Contohnya, apabila tegangan surja 5000V diberikan pada 10 belitan, maka tegangan 500V akan muncul pada setiap belitan. Sedangkan apabila belitan tersebut di pasang pada inti besi, distribusi tegangannya tidak akan linier lagi. Pada udara, kecepatan surja untuk melewati kumparan akan mendekati kecepatan cahaya, sedangkan pada inti besi akan lebih lambat. Bukan hanya melambatkan saja, inti besi juga akan menyerap energi pada surja dengan frekuensi tinggi. Semakin besar frekuensi yang digunakan, maka semakin besar pula energi yang diserap [10].

2.6 Metode *Error Area Ratio* (EAR)

Metode EAR adalah metode yang paling efektif untuk menganalisa perbedaan gelombang surja. Hal ini dikarenakan sensitifitas yang sangat tinggi terhadap perubahan gelombang. Persamaan EAR adalah sebagai berikut :

$$EAR = \frac{\sum_{i=1}^N |F_i^{(1)} - F_i^{(2)}|}{\sum_{j=1}^N |F_j^{(1)}|} \times 100 \quad (2.5)$$

$$EAR = \frac{\sum_{i=1}^N \|F_i^{(1)}\| - \|F_i^{(2)}\|}{\sum_{j=1}^N |F_j^{(1)}|} \times 100 \quad (2.6)$$

Keterangan :

$F_i^{(1)}$ = poin ke-i pada gelombang referensi

$F_i^{(2)}$ = poin ke-i pada gelombang pengujian

Cara kerja persamaan 2.5 diatas adalah dengan mengurangi titik pada setiap gelombang referensi dengan gelombang pengujian mulai gelombang positif, nol, dan negatif. Apabila gelombang pengujian jauh lebih kecil daripada gelombang referensi, maka dimungkinkan jumlah hasil pengurangan kedua gelombang lebih besar nilainya dari pada gelombang referensi, sehingga nilai EAR yang didapat bisa diatas 100%. Agar nilai EAR tetap dibawah nilai 100%, maka dilakukan modifikasi rumus EAR dengan cara kerja setiap titik pada gelombang referensi dan

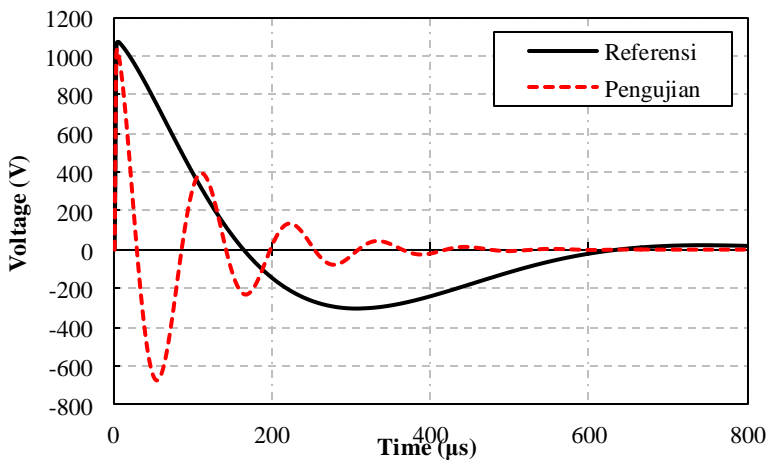
pengujian diabsolutkan terlebih dahulu, kemudian gelombang referensi akan di kurangi gelombang pengujian. Untuk persamaan EAR modifikasi, dapat dilihat pada persamaan 2.6.

Misalkan pada suatu pengujian didapatkan gelombang sesuai Gambar 2.4. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa gelombang pengujian lebih kecil dari pada gelombang referensi, apabila rumus EAR asli pada persamaan 2.5 yang digunakan untuk mengolah data gelombang, maka hasil pengolahan gelombang akan tampak pada Gambar 2.5, dan menghasilkan nilai EAR 102.8%. Sedangkan, apabila rumus EAR modifikasi pada persamaan 2.6 yang digunakan, maka pengolahan gelombang akan tampak seperti pada Gambar 2.6, dan menghasilkan EAR 65.3%. Pada penelitian ini, pengolahan gelombang menggunakan rumus modifikasi EAR pada persamaan 2.6.

Dalam tes surja terdapat tiga metode dalam pengujian EAR yaitu *Pulse to Pulse* EAR (P-P EAR), *Line to Line* EAR (L-L EAR) dan *Test-Ref* EAR [10].

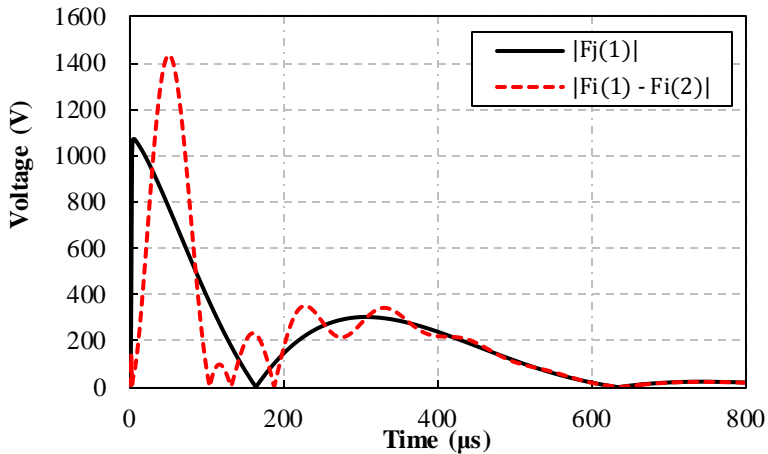
2.6.1 P-P EAR

Pulse to Pulse EAR adalah metode untuk membandingkan perbedaan gelombang uji terhadap gelombang uji sebelumnya, dengan cara menguji surja terhadap suatu kumparan dengan menaikkan tegangan secara bertahap sebesar 4% sampai mencapai tegangan maksimum uji surja,

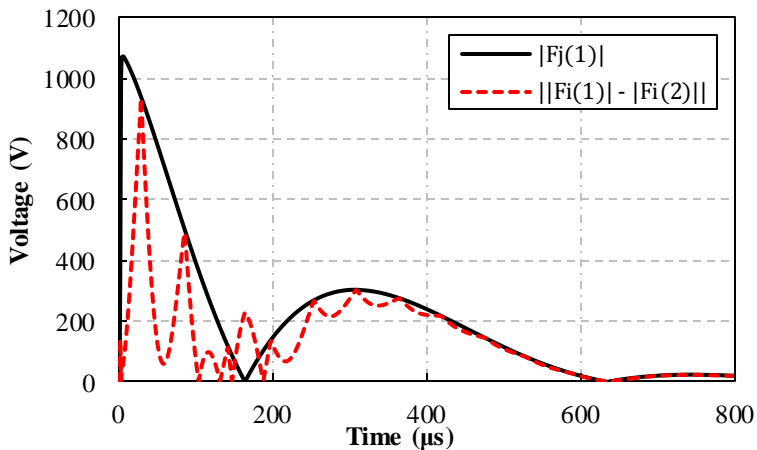


Gambar 2.4 Gelombang surja referensi dan pengujian

sesuai standar yang digunakan. Misalkan tegangan maksimum yang kita ujikan adalah 2000V, maka dengan kenaikan 20V setiap pengujian dengan batas minimal 500V mendapatkan 75 kali pengujian. P-P EAR dianggap baik apabila nilai maksimumnya 5%, dan dianggap buruk apabila nilainya diatas 12% [10].



Gambar 2.5 Pengolahan gelombang dengan persamaan 2.5



Gambar 2.6 Pengolahan gelombang dengan persamaan 2.6

2.6.2 L-L EAR

Line to Line EAR adalah metode untuk membandingkan gelombang surja antar fasa belitan. Pengujian ini umumnya dilakukan pada motor 3 fasa dengan melepas rotornya. Sebab posisi rotor akan mempengaruhi bentuk gelombang surja [10]. Terdapat beberapa kondisi yang mempengaruhi nilai dari hasil tes dengan metode ini yaitu: (1) posisi rotor, (2) konfigurasi belitan, (3) kondisi rotor, (4) koneksi motor, (5) kondisi laminasi besi (*iron condition*) dan (6) *iron saturation*.

2.6.3 Test-Ref EAR

Pada aplikasinya *Test-Ref* EAR digunakan untuk menguji belitan dalam produksi masal. Data gelombang surja dari salah satu manufaktur belitan motor akan dibandingkan dengan gelombang surja motor yang lain [10].

Untuk ketiga metode pengujian EAR tersebut memiliki standar error masing-masing yang dapat dilihat pada Tabel 2.1. berikut [11] :

Tabel 2.2 Standar EAR

	L-L EAR %	P-P EAR %	Test Ref %
Field, Lap Winding	10-30% of Off	5-15%	Manufacturing
Field Concentric	35-65% of Off	5-15%	Manufacturing
Manufacturing	5-15% - No rotor installed	5-15%	5-15%
Rotor Installed	15-65%	5-15%	10-25%

2.7 Pembangkit Tegangan Tinggi DC

Pada pembangkitan tegangan tinggi DC menggunakan rangkaian *single secondary winding villard cascade* yang merupakan pengembangan dari rangkaian *cockcroft-walton*. Rangkaian ini memparalel rangkaian *cockcroft-walton*, dengan membalik polaritas salah satu rangkaianannya. Skema rangkaianannya dapat dilihat pada Gambar 2.7.

Tegangan output pada rangkaian ini memiliki riak yang rendah, selain itu tegangan yang dibangkitkan 2 kali lebih tinggi dari pada rangkaian *cockcroft-walton*. Persamaan tegangan output sebagai berikut :

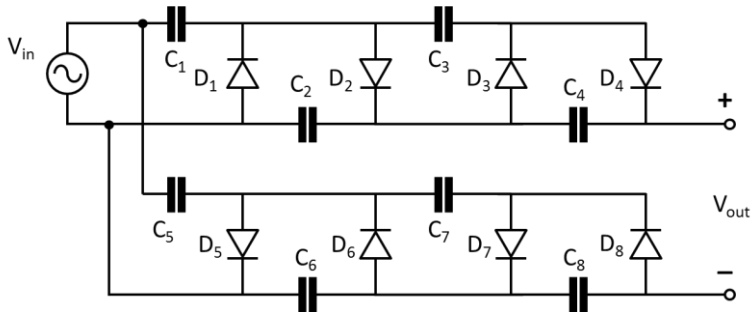
$$V_{out} = 4 \times N \times V_{peak\ input} \quad (2.7)$$

Keterangan:

V_{out} = Tegangan *output* rangkaian *single secondary winding*

N = Jumlah stage pada setiap polaritas

$V_{peak\ input}$ = Tegangan puncak *input*



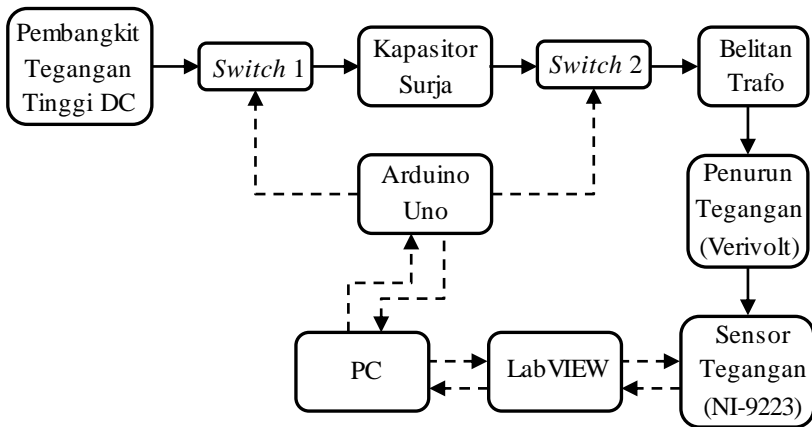
Gambar 2.7 Rangkaian *single secondary winding villard cascade*

BAB 3

PERANCANGAN SISTEM DAN ALAT

3.1 Konfigurasi Sistem

Pada penelitian ini desain peralatan tes surja meliputi beberapa hal yaitu: perancangan rangkaian tes surja, perancangan belitan trafo untuk mensimulasikan kerusakan, desain software akuisisi data, dan analisa data hasil pengujian. Diagram pengujian tes surja dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Konfigurasi sistem tes surja

Pada pengujian surja ini terdapat beberapa komponen penting, yaitu :

1. Autotrafo dan sumber AC.
2. *Single secondary winding villard cascade.*
3. Switch tegangan tinggi yang dikontrol dengan arduino uno
4. Rangkaian kapasitor surja dengan nilai tegangan 1600V, dan kapasitansi 10nF.
5. Belitan trafo dengan kondisi yang bervariasi.
6. Penurun tegangan dengan Verivolt.
7. Sensor tegangan dengan NI-9223.
8. LabVIEW dan software lainnya sebagai penunjang pengolahan analisa data.

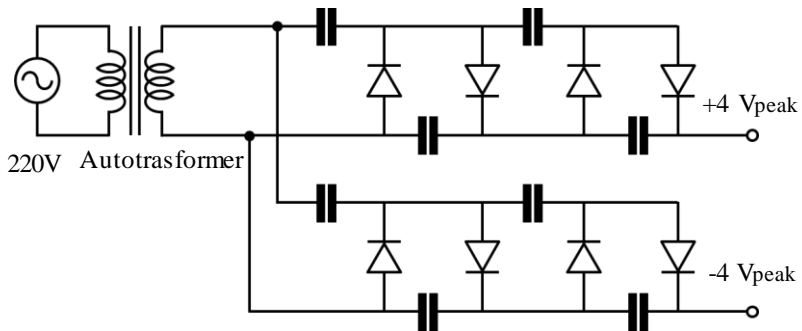
Proses pembangkitan gelombang surja ini dimulai dari autotrafo sebagai sumber tegangan yang nantinya akan dinaikkan tegangannya menggunakan rangkaian *single secondary winding villard cascade*. Tegangan yang terbangkit adalah tegangan tinggi DC. PC akan mengirimkan data ke arduino untuk mengontrol *switch* 1 dan *switch* 2. *Switch* 1 akan menutup selama 5 detik sehingga muatan tegangan tinggi DC akan disimpan ke kapasitor surja. Setelah *switch* 1 membuka, dengan jarak waktu 1 mili detik, maka *switch* 2 akan menutup selama 3 detik, dan mengirimkan muatan kapasitor ke belitan trafo, dan akan terbentuk rangkaian ekivalen surja seperti Gambar 2.3. Disaat *switch* 1 dan *switch* 2 membuka atau menutup, arduino akan mengirimkan kondisi kedua *switch* tersebut. Gelombang surja pada belitan trafo akan diturunkan tegangannya menggunakan verivolt dengan perbandingan 2000V:10V. PC akan memerintahkan LabVIEW untuk merekam data menggunakan sensor tegangan NI-9223. Tegangan gelombang yang sudah diturunkan akan direkam, dan ditampilkan pada LabVIEW. Lalu PC akan mengirimkan perintah stop ke LabVIEW untuk mengakhiri perekaman data.

3.2 Perancangan *Hardware*

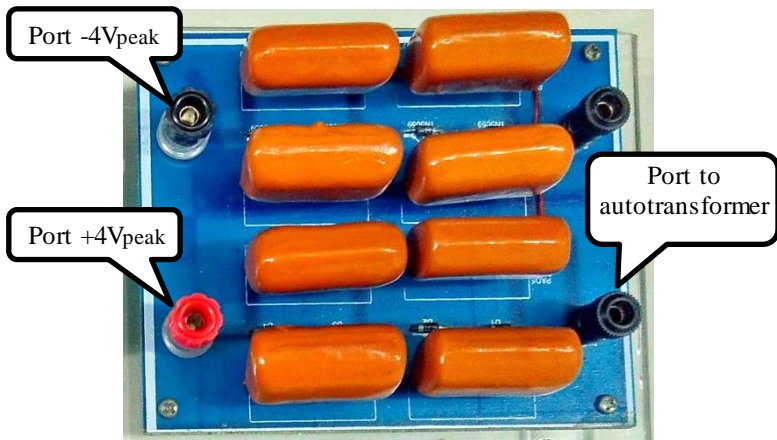
Penelitian ini dilakukan dengan beberapa perancangan *hardware*, yaitu meliputi desain dan perancangan pembangkit tegangan tinggi DC, desain dan rangkaian *switch* tegangan tinggi, desain rangkaian kapasitor surja, dan desain trafo dengan *external tabs* untuk simulasi *turn fault*.

3.2.1 Pembangkit Tegangan Tinggi DC

Perancangan pembangkit tegangan tinggi DC ini meliputi beberapa komponen yaitu: sumber AC 220V, *autotraformer*, dan *single secondary winding villard cascade*. Rangkaian *single secondary winding villard cascade* terdiri dari 2 *stage cockcroft-walton* pada bagian atas, dan 2 *stage cockcroft-walton* pada bagian bawah dengan membalik dioda. Sehingga tegangan yang terbangkit adalah $+4 V_{peak}$ pada bagian atas dan $-4 V_{peak}$ pada bagian bawah. Semua komponen tersebut disusun seperti Gambar 3.2. Pada rangkaian ini menggunakan 8 buah dioda dengan tegangan *block* maksimum 4kV, dan menggunakan 8 buah kapasitor dengan kapasitas 10nF dan tegangan 2000V. Desain pembangkit tegangan tinggi DC dapat dilihat pada Gambar 3.2, sedangkan implementasinya pada Gambar 3.3.



Gambar 3.2 Desain pembangkit tegangan tinggi DC



Gambar 3.3 Implementasi *single secondary winding villard cascade*

Autotrafo pada rangkaian ini digunakan untuk membangkitkan tegangan tinggi DC sesuai dengan kebutuhan. Tegangan output dari rangkaian ini adalah 8 kali V_{peak} input atau sesuai dengan persamaan 2.7, maka tegangan maksimum yang mampu dibangkitkan oleh rangkaian ini apabila semua komponen ideal adalah:

$$\begin{aligned}
 V_{out} &= 4 \times N \times V_{peak\ input} \\
 V_{out} &= 4 \times 2 \times 220\sqrt{2} \\
 &= 2489\ V
 \end{aligned}$$

3.2.2 Rangkaian Switching

Pemilihan spesifikasi dan jenis *switch* sangat berpengaruh pada penelitian ini, karena akan memberikan pengaruh yang besar pada gelombang surja. Rangkaian *switching* ini terdiri dari 2 buah *switch* yang dikontrol PC melalui arduino dengan komunikasi serial, seperti terlihat pada Gambar 3.6. *Switch* 1 (S1) digunakan untuk mengisi muatan kapasitor surja, sedangkan *switch* 2 (S2) digunakan untuk melepas muatan kapasitor surja ke belitan trafo. Skema rangkaian *switching* dapat dilihat pada Gambar 3.4.

Untuk pemilihan *switch* 1 menggunakan *reed relay*, sedangkan untuk pemilihan *switch* 2 menggunakan IGBT dengan tipe IRGPS60B120KDP. Hal ini dikarenakan pada penelitian sebelumnya, apabila *switch* 2 menggunakan *reed relay*, gelombang surja yang terbangkit mengalami *noise* yang disebabkan karena terjadinya *bouncing* atau *reed relay* tidak bisa menutup sempurna dengan seketika untuk melepas muatan kapasitor [12]. Implementasi rangkaian *switching* dapat dilihat pada Gambar 3.5.

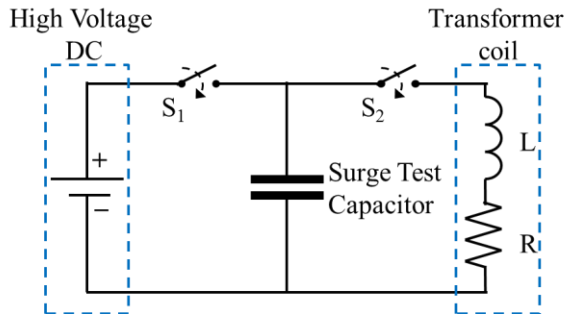
Spesifikasi *switch* 1 yang digunakan sesuai Tabel 3.1, sedangkan untuk spesifikasi *switch* 2 sesuai Tabel 3.2. Untuk datasheet *reedrelay* dan IGBT, dapat dilihat pada lampiran B

Table 3.1 Spesifikasi *reed relay*

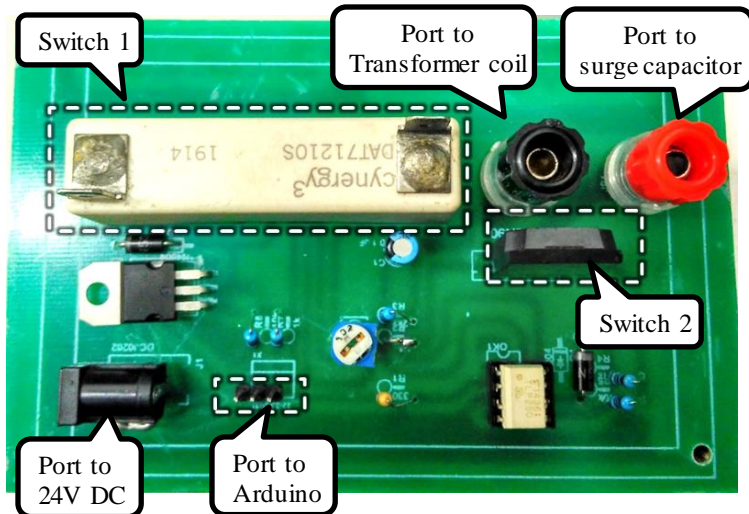
Contact	Condition	Value
Isolation across contact	DC or AC peak	10 kV
Maximum switching voltage	DC or AC peak	7 kV
Maximum switching current	DC or AC peak	2 A
Release time	Diode Fitted	2 ms

Table 3.2 Spesifikasi IGBT

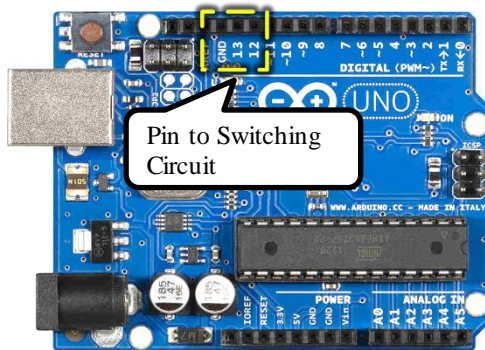
	Parameter	Max.
V_{CES}	Collector to Emitter Voltage	1200 V
$I_C @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Collector Current	105 A
$I_C @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Collector Current	60 A
$I_F @ T_C = 25^\circ C$	Diode Continuous Forward Current	120 A
$I_F @ T_C = 100^\circ C$	Diode Continuous Forward Current	60 A
$V_{FM} @ I_C 60 A$	Diode Forward Voltage Drop	2.20 V
td(on)	Turn-On Delay Time	94 ns



Gambar 3.4 Skema rangkaian *switching*



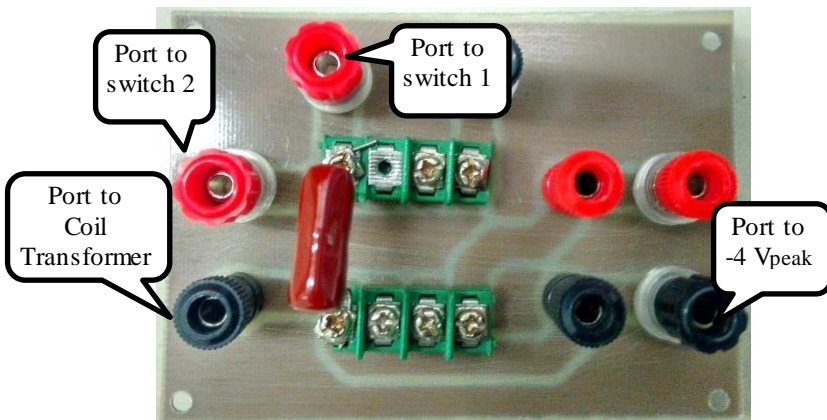
Gambar 3.5 Implementasi rangkaian *switching*



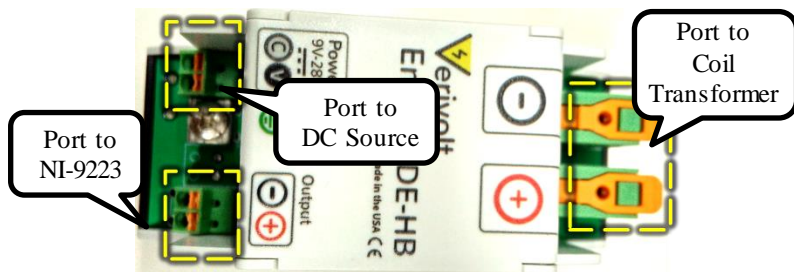
Gambar 3.6 Arduino

3.2.3 Rangkaian Kapasitor Surja

Kapasitor surja merupakan bagian penting pada penelitian ini, karena kapasitor ini akan membangkitkan tegangan surja ketika di seri dengan belitan trafo. Skema rangkaian kapasitor surja juga dapat dilihat pada Gambar 3.4, sedangkan implementasinya dapat dilihat pada Gambar 3.7. Cara kerja kapasitor surja ini adalah dengan diisi dengan muatan dengan kapasitas tegangan tertentu, setelah itu muatan tersebut dilepaskan ke belitan trafo melalui switch tegangan tinggi, dan terbangkit gelombang surja. Karena belitan trafo terdiri dari induktor dan resistor, maka rangkaian keseluruhan adalah rangkaian RLC seri.



Gambar 3.7 Implementasi rangkaian kapasitor surja



Gambar 3.8 Verivolt

3.2.4 Verivolt

Verivolt merupakan alat yang digunakan sebagai penurun tegangan, yang memiliki skala linier. Alat ini sering digunakan dalam industri dan kegiatan penelitian. Pada penelitian ini, verivolt yang digunakan bertipe DE-HB yang memiliki *bandwidth* sebesar 20MHz, akurasi 0.2%, dan perbandingan *input:output* 2000V:10V. Karena akurasi sangat baik, maka alat ini mampu digunakan dalam tes surja yang memiliki durasi yang singkat [13]. Gambar dari verivolt dapat dilihat pada Gambar 3.8.

3.2.5 Sensor Tegangan NI-9223

NI-9223 merupakan sensor tegangan yang mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital (ADC) dengan sample rate 1 MHz. NI-9223 memiliki 4 input sinyal analog, tegangan sinyal analog yang diizinkan masuk berkisar $\pm 10V$.

Pada penelitian ini, output dari verivolt dengan perbandingan 2000V:10V akan dimasukkan ke NI-9223 melalui prob dengan perbandingan 1:1 ke channel AI2. Gambar dari NI-9223 dapat dilihat pada Gambar 3.9. Sinyal digital akan dikirimkan ke PC dan ditampilkan ke LabVIEW.

3.3 Perancangan Software

Pada penelitian ini terdapat dua *software* utama yang digunakan untuk mengontrol *switch* 1 dan *switch* 2 yaitu program arduino, dan untuk mengolah data gelombang surja yaitu LabVIEW.

3.3.1 Perancangan Program Arduino

Program arduino yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada lampiran. Tujuan utama program arduino ini digunakan untuk



Gambar 3.9 NI-9223

mengontrol *switch*. Program tersebut memiliki satu buah perintah *input* yang kemudian melakukan dua buah *output*. Penjelasan program tersebut dapat dilihat sebagai berikut:

1. Pada awalnya kedua *switch* dalam keadaan terbuka.
2. Ketika arduino mendapatkan perintah dari PC, maka arduino akan mengeksekusi program.
3. Eksekusi pertama yaitu *switch* 1 tertutup selama 5 detik untuk *charging* kapasitor surja.
4. Setelah 5 detik maka *switch* 1 akan terbuka.
5. Kemudian setelah 1 mili detik, maka *switch* 2 akan tertutup selama 3 detik.
6. Setelah *switch* 2 terbuka, maka arduino akan mengirimkan serial data ke PC bahwa telah menjalankan perintah dengan benar.

3.3.2 Perancangan Program LabVIEW

Pada penelitian ini LabVIEW digunakan untuk menampilkan dan mengolah data. Cara kerjanya adalah, LabVIEW akan menerima perintah dari PC untuk memulai merekam data menggunakan NI-9223 secara manual saat tombol *start* diaktifkan, dan perekaman berakhir saat tombol *stop* diaktifkan. Untuk program LabVIEW yang digunakan dapat dilihat pada lampiran.

3.4 Perancangan Trafo

Untuk mendapatkan kerusakan pada trafo dengan akurat seperti pada kondisi yang ada dilapangan, maka diperlukan desain trafo yang dapat dirubah persentase kerusakan atau *short circuit* antar belitan. Pada penelitian ini menggunakan dua buah trafo dengan desain yang sama.

Trafo yang digunakan memiliki spesifikasi seperti pada Tabel 3.3 berikut.

Kerusakan pada trafo akan didesain dengan tipe kerusakan isolasi antar *turn*. Untuk mensimulasikan kerusakan tersebut maka digunakan *external tab* dengan *port* yang dapat dihubungkan seperti pada Gambar 3.10. Pada Gambar 3.10 terlihat bahwa kumparan trafo primer dan sekunder diambil beberapa *turn* untuk dihubungkan ke *external tab*. Jumlah *turn* pada sisi primer adalah 390 *turn*, sedangkan pada sisi sekunder adalah 225 *turn*. *Turn* yang dikeluarkan ke *external tab* akan berbeda sesuai desain yang diinginkan, hal ini dikarenakan tidak memungkinkannya mengeluarkan belitan trafo dengan presisi pada salah satu sisi yang diinginkan. Oleh karena itu *external tab* belitan trafo yang sesungguhnya dapat dilihat pada Tabel 3.4, dan skemanya pada Gambar 3.12. Untuk *external tab turn fault* diambil dari presentase jumlah belitan pada kumparan primer dan sekunder.

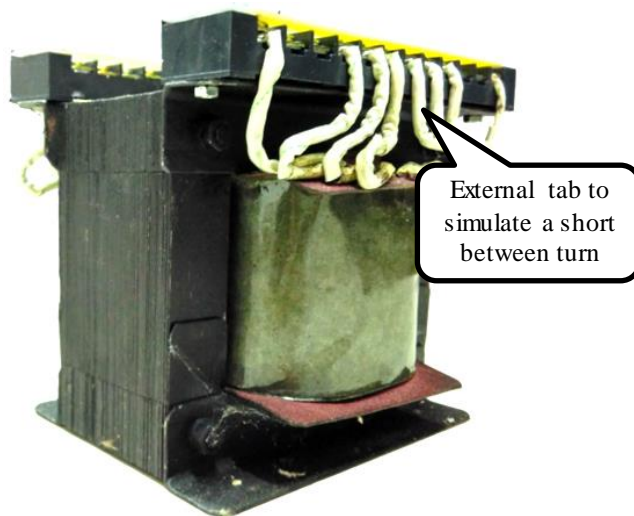
Trafo juga menggunakan desain kumparan seperti pada umumnya, yaitu kumparan primer terletak pada bagian dalam, sehingga lebih dekat dengan *core*, sedangkan kumparan sekunder terletak pada bagian luar dari pada kumparan primer, seperti terlihat pada Gambar 3.11.

Tabel 3.3 Spesifikasi trafo

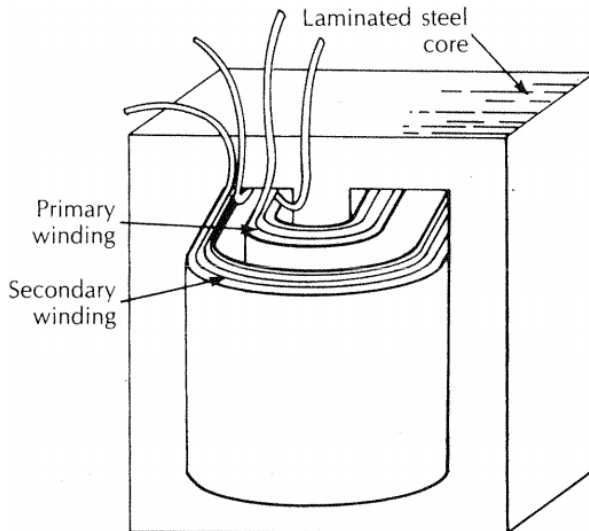
Type	Dry
VA rating	1000 VA
Voltage ratio	220/127 V
Turn ratio	390/225 Turn

Tabel 3.4 Nomor *turn* yang dikeluarkan ke *external tab*

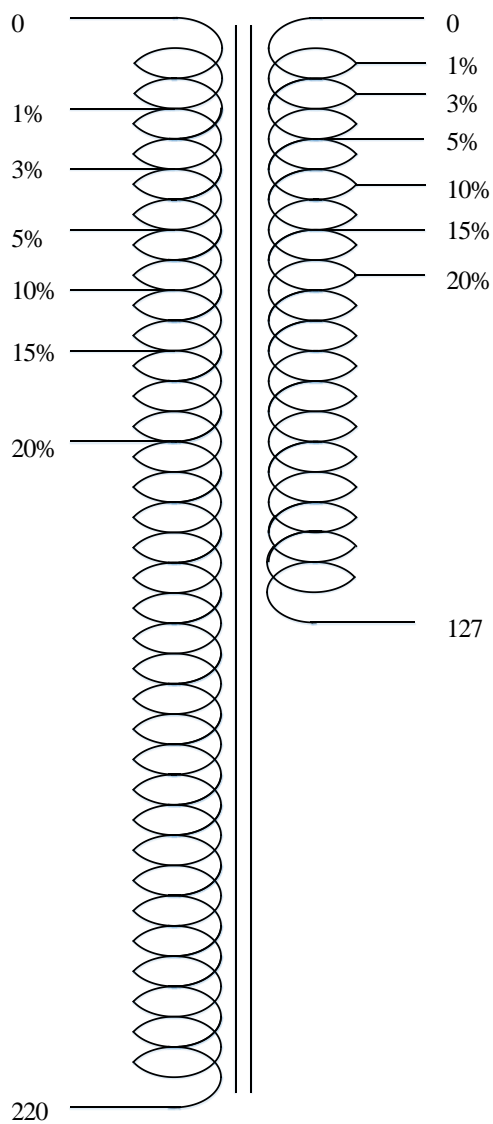
	Winding voltage		Winding voltage	
	127	220	127	220
External tab turn fault (%)	Turn number (Design)	Turn number (Design)	Turn number (Real)	Turn number (Real)
1	2.25	3.9	2	4
3	6.75	11.7	7	12
5	11.25	19.5	11	20
10	22.5	39	22	39
15	33.75	58.5	34	59
20	45	78	45	78



Gambar 3.10 Trafo dengan *external tab*



Gambar 3.11 Kumparan trafo primer dan sekunder [6]



Gambar 3.12 Skema *turn* yang dihubungkan dengan *external tab* pada trafo

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

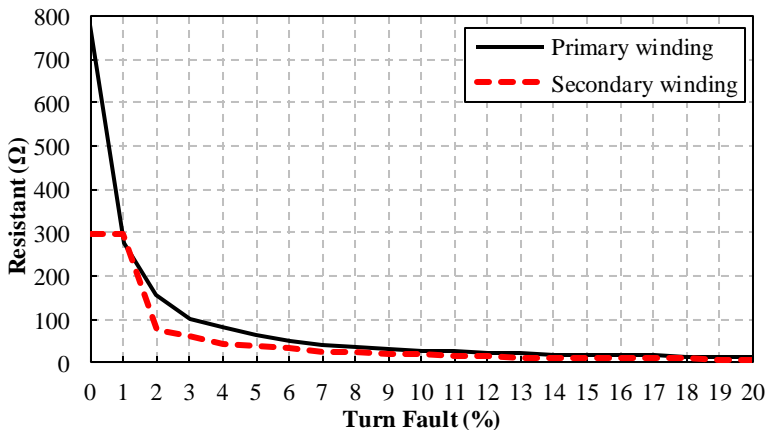
DETEKSI KERUSAKAN ISOLASI TRAF0 MENGGUNAKAN UJI SURJA

Bab ini berisikan pengujian peralatan surja dan hasil analisis respon uji surja pada belitan trafo. Pengujian peralatan surja bertujuan untuk mengetahui akurasi peralatan uji surja. Sedangkan untuk analisa respon uji surja pada belitan trafo bertujuan untuk mengetahui kondisi kerusakan isolasi belitan trafo menggunakan metode *Error Area Ratio* (EAR).

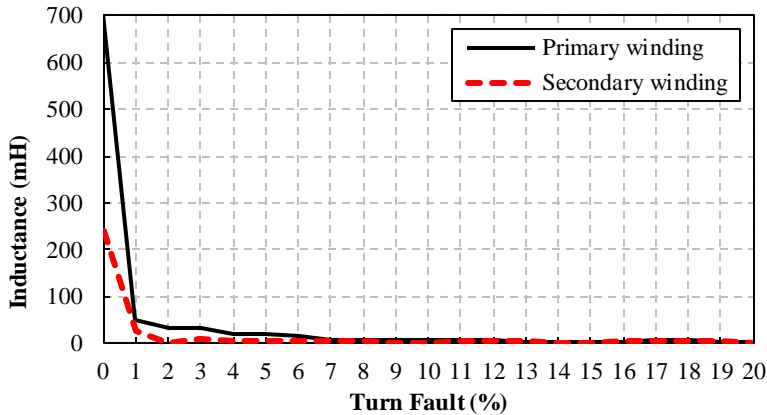
4.1 Pengukuran Belitan Trafo

Pengujian belitan trafo dilakukan untuk mengetahui resistansi dan induktansi pada belitan trafo di sisi primer dan sekunder. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat LCR meter.

Cara pengujian ini dilakukan dengan trafo dalam keadaan normal dan dalam keadaan *fault*. Pengujian pada kondisi *fault* dilakukan dengan cara melakukan *short circuit* yang disengaja pada *external tab* trafo menggunakan kabel *jumper* seperti yang ada pada Gambar 3.10. Sedangkan variasi *fault* yang digunakan sama dengan variasi *short circuit* seperti pada Tabel 4.4. Hasil pengukuran sesuai pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.1 Resistansi belitan trafo primer dan sekunder



Gambar 4.2 Induktansi belitan trafo primer dan sekunder

Dari hasil pengukuran tersebut, diketahui bahwa terjadi penurunan yang cukup signifikan pada resistansi dan induktansi pada kondisi trafo dalam keadaan normal ke kondisi trafo dalam keadaan fault. Hal ini dikarenakan adanya efek *core* yang mempengaruhi pengukuran LCR sesuai persamaan 2.1.

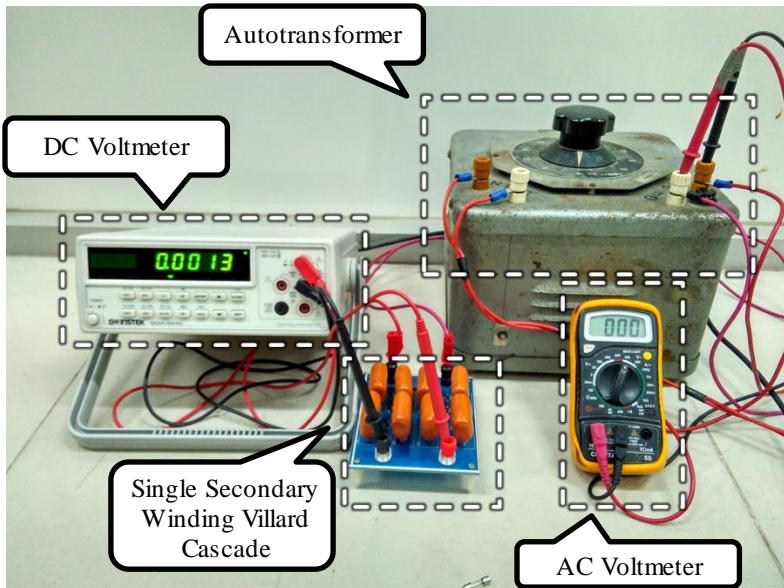
4.2 Hasil dan Analisis Pengujian Pembangkit Tegangan Tinggi DC

Pengujian tegangan DC ini menggunakan autotrafo dengan input tegangan AC 220V dan output 0V sampai 220V sebagai sumber rangkaian pembangkit tegangan tinggi DC yaitu *single secondary winding villard cascade*. Pada saat pengambilan data, tegangan *output* mengalami penurunan setengah dari yang mampu dibangkitkan, ini membuktikan bahwa terjadi kerusakan pada rangkaian *single secondary winding villard cascade* sisi $-4V_{peak}$ atau sisi ini tidak aktif. Tegangan *output* rangkaian ini akan dibandingkan dengan tegangan *output* perhitungan berdasarkan tegangan *input* rms dari autotrafo, yang dapat dilihat pada Tabel 4.1. Sedangkan proses pengujian pembangkit tegangan tinggi DC dapat dilihat pada Gambar 4.3.

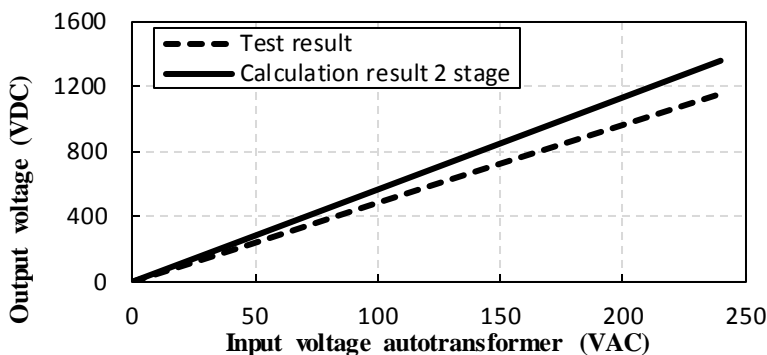
Dari Gambar 4.4 terlihat bahwa grafik dari tegangan *output* DC hampir sama, ini disebabkan karena pengaruh ketidak idealan dari komponen dan perubahan ketidak setabilan sumber AC dari jala-jala, dengan error rata-rata sebesar 14,9%.

Tabel 4.1 Hasil pengujian dan perhitungan pembangkit tegangan tinggi DC

Tegangan <i>input</i> rms (Volt)	Tegangan <i>output</i> pengujian (Volt)	Tegangan <i>output</i> perhitungan (Volt)
0	0	0
48	229	226.3
96	465	452.5
144	696	678.8
192	924	905.1
240	1154	1131.4



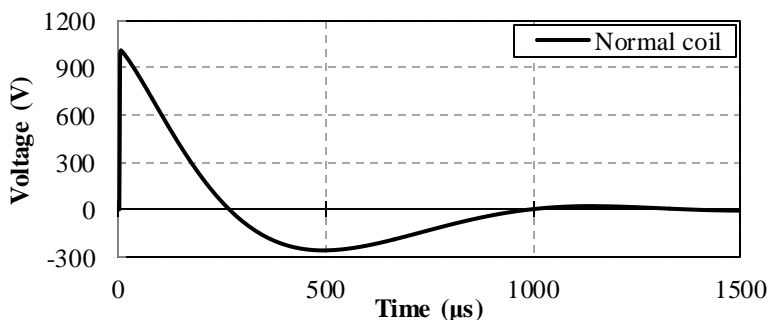
Gambar 4.3 Setup pembangkit tegangan tinggi DC



Gambar 4.4 Hasil pengujian tegangan DC menggunakan rangkaian *single secondary winding villard cascade*

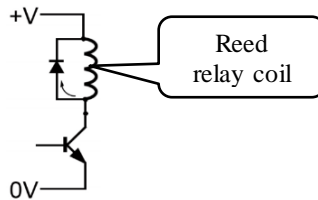
4.3 Hasil dan Analisis *Switching* Gelombang Surja

Switch 1 akan membuka dalam waktu 5 detik setelah menutup, kemudian dilanjutkan dengan *switch* 2 yang menutup setelah 1ms *switch* 1 membuka. *Switch* 1 yang menggunakan *reed relay*, berdasarkan *data sheet* memiliki *release time* 2ms, yang bisa dianggap *switch* 2 akan menutup sebelum *switch* 1 membuka. Karena *switch* 1 belum membuka, hal ini tidak akan menimbulkan gelombang surja atau belitan masih terhubung dengan sumber. Namun percobaan uji surja pada belitan trafo belitan primer 220V pada Gambar 4.5 dengan delay antara *switch* 1 dan *switch* 2 selama 1ms membuktikan bahwa gelombang surja sudah terbentuk. Ini membuktikan bahwa *switch* 1 sudah terbuka saat *switch* 2 menutup.



Gambar 4.5 Bentuk gelombang tegangan surja

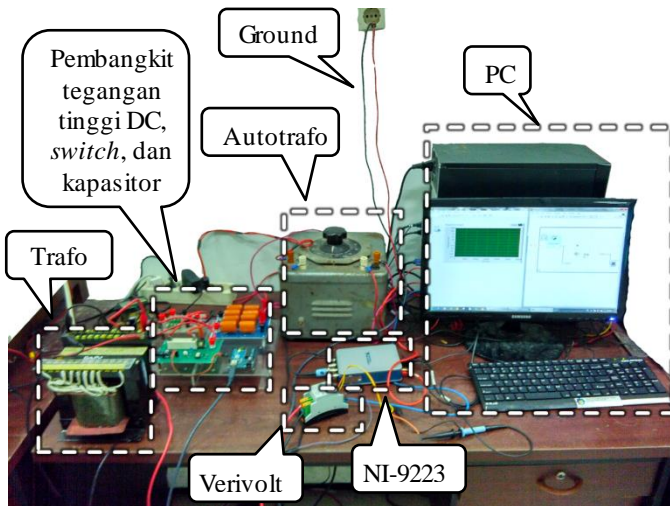
Berdasarkan sumber dari *technical guide to reed relays*, *release time* pada *reed relay* adalah total waktu dari mulai *reed relay* lepas, sampai selesainya *bouncing* (2ms). Namun dikatakan jika *reed relay* yang sudah ditambahkan dioda seperti pada Gambar 4.6 maka *release time* bisa lebih cepat dengan nilai *typical* sekitar 120 μ s [14].



Gambar 4.6 *Reed relay* dengan dioda

4.4 Hasil dan Analisis Pengujian Gelombang Surja

Pada pengujian gelombang surja ini dimaksudkan untuk mengetahui *rise time* gelombang yang dibangkitkan terhadap standar tegangan uji yang diberikan pada belitan trafo, dan juga untuk mengetahui bentuk gelombang surja yang dibangkitkan. Gambar 4.7 menunjukkan *setup* pengambilan data tes surja.



Gambar 4.7 *Setup* pengambilan data tes surja

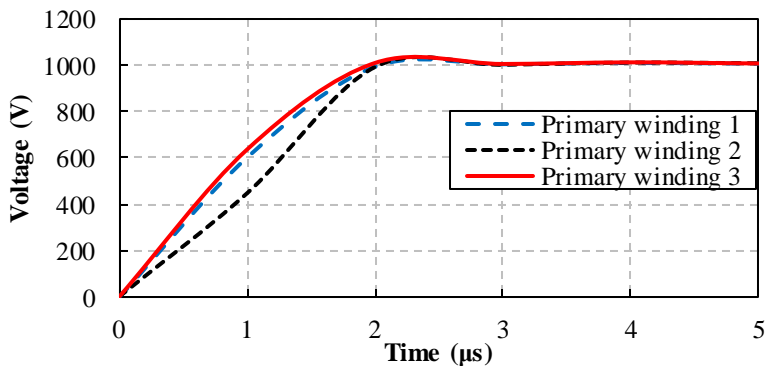
4.4.1 Hasil *rise time* Gelombang Surja

Dalam melakukan uji surja, tegangan maksimal yang diujikan pada belitan trafo sesuai standar EASA sesuai persamaan pada Tabel 2.1 yaitu $2 \times V_{Line} + 1000$, sehingga tegangan maksimal primer dan sekunder sebesar 1440V dan 1254V. Namun peralatan uji surja memiliki batasan tegangan maksimum sebesar 1200V. Hal ini mengacu pada tegangan maksimum *switch* 2 yang berupa IGBT. IGBT akan rusak apabila tegangan yang ditahan melebihi tegangan maksimum tersebut, sehingga pada penelitian ini tegangan surja yang diujikan pada belitan trafo primer maupun sekunder dipilih 1000V.

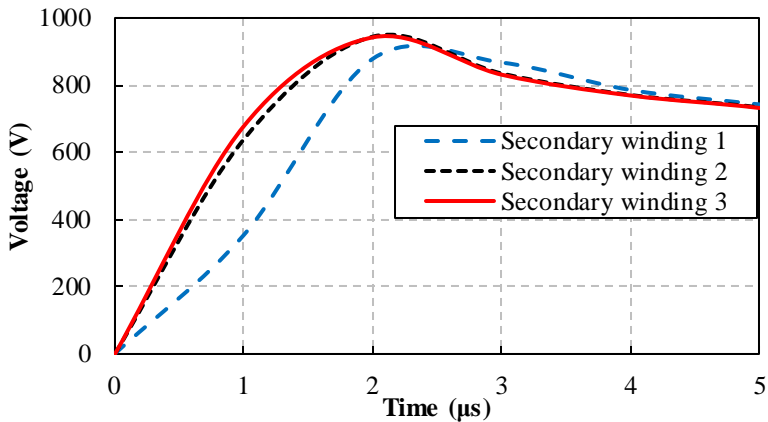
Tabel 4.2 *Rise time* hasil pengujian

Number test	Rise Time Transformer	
	Primary 220V	Secondary 127 V
1	1.6013 μ s	1.6019 μ s
2	1.5969 μ s	1.6010 μ s
3	1.6018 μ s	1.6001 μ s
Average	1.6000 μ s	1.6010 μ s

Dari Tabel 4.2, dapat dilihat bahwa *rise time* yang terbentuk dari uji surja pada belitan trafo primer dan sekunder dengan tegangan 1000V, memiliki *rise time* yang hampir sama berkisar 1,6 μ s. Hal ini disebabkan karena tegangan yang diujikan sudah melebihi tegangan rekomendasi IEEE 522. Grafik *rise time* dari belitan primer dan sekunder pada trafo terlihat pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9.



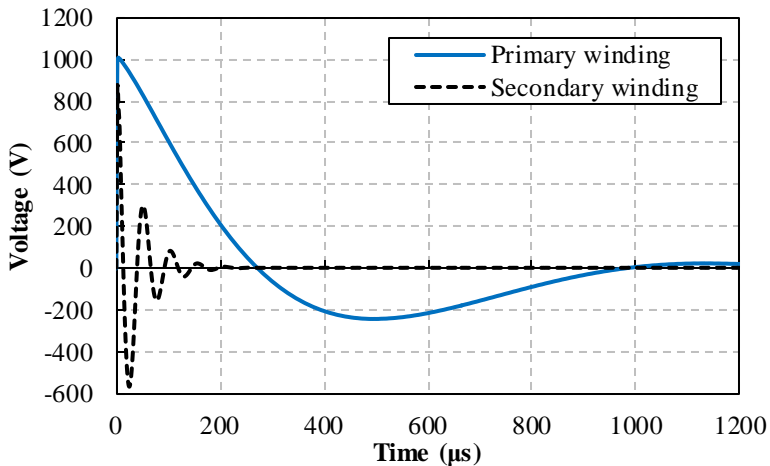
Gambar 4.8 *Rise time* tegangan surja pada belitan primer trafo



Gambar 4.9 Rise time tegangan surja pada belitan sekunder trafo

4.4.2 Hasil dan Analisis Bentuk Gelombang Surja

Gelombang surja pada trafo kumparan primer maupun sekunder yang terbentuk, tidak memiliki *noise* dan dapat dilihat pada Gambar 4.10, sehingga bisa dianalisa menggunakan metode *Error Area Ratio* (EAR). Apabila gelombang surja mengalami *noise*, maka keakuratan metode EAR akan berkurang.



Gambar 4.10 Gelombang surja primer dan sekunder

4.5 Hasil Tes Surja, EAR, dan Zero Crossing Pada Trafo

Trafo yang digunakan memiliki *external tab* pada sisi primer dan sekunder yang bisa digunakan untuk menyimulasikan kerusakan yang terjadi pada belitan. Kerusakan pada belitan trafo berupa hubung singkat antara belitan, sehingga jumlah belitan yang awalnya 100% akan berkurang sebanyak persentase *short circuit* yang terjadi. Nomor *turn* yang dikeluarkan ke *external tab* dapat dilihat pada Tabel 3.4. Tabel 4.3 berikut adalah macam-macam persentase variasi *short circuit* yang akan digunakan sebagai pengujian tegangan surja.

Tabel 4.3 Persentase variasi *short circuit*

Fault Condition	Short Circuit Condition
1%	0 to 1
2%	1 to 3
2%	3 to 5
3%	0 to 3
4%	1 to 5
5%	0 to 5
5%	5 to 10
5%	10 to 15
5%	15 to 20
7 %	3 to 10
9%	1 to 10
10%	0 to 10
10%	5 to 15
10%	10 to 20
12%	3 to 15
14%	1 to 15
15%	0 to 15
15%	5 to 20
17%	3 to 20
19%	1 to 20
20%	0 to 20

Dari berbagai variasi diatas juga akan dianalisa nilai EAR dan *Zero Crossing*nya. Untuk metode EAR yang digunakan adalah *Test-Ref* EAR dengan menggunakan rumus *modified* EAR dapat dilihat pada persamaan 2.5. Sedangkan *zero crossing* digunakan untuk melihat

panjang gelombang saat gelombang tersebut berada pada garis Y (tegangan) sama dengan nol, maka dapat dicari waktu dari gelombang 1.2 cycle, 1 cycle, dan 3.2 cycle.

4.5.1 Cara Mencari Gelombang Referensi

Dalam metode EAR diperlukan gelombang referensi yang digunakan sebagai pembanding terhadap gelombang lainnya. Dalam penelitian ini, gelombang referensi adalah gelombang surja pada saat trafo dalam keadaan normal, atau tidak terjadi *turn fault*, yang kemudian akan dibandingkan dengan gelombang trafo yang dihasilkan saat trafo dalam keadaan *turn fault*.

Untuk mencari gelombang referensi, dilakukan beberapa pengujian surja. Dalam penelitian menggunakan 5 kali uji surja pada belitan primer dan sekunder saat trafo dalam keadaan normal. Kelima gelombang referensi dari hasil pengujian tersebut akan dibandingkan dengan satu per satu dengan dirinya sendiri, untuk mencari nilai EAR yang dihasilkan. Gelombang yang layak digunakan sebagai gelombang referensi akan dipilih berdasarkan nilai EAR rata-rata yang dihasilkan. Berikut adalah contoh pencarian gelombang referensi pada trafo belitan primer yang dilakukan dengan uji surja sebanyak 5 kali dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut:

Tabel 4.4 Nilai EAR gelombang referensi

No	Perbandingan gelombang uji	EAR (%)
1	1 : 2	3.7389
2	1 : 3	6.2335
3	1 : 4	1.2350
4	1 : 5	6.2241
5	2 : 1	3.6512
6	2 : 3	2.6336
7	2 : 4	4.5170
8	2 : 5	2.6875
9	3 : 1	5.9873
10	3 : 2	2.5902
11	3 : 4	6.7489
12	3 : 5	1.6548
13	4 : 1	1.2504
14	4 : 2	4.6832

Tabel 4.4 Nilai EAR gelombang referensi (lanjutan)

No	Perbandingan gelombang uji	EAR (%)
15	4 : 3	7.1143
16	4 : 5	6.1755
17	5 : 1	6.0788
18	5 : 2	2.6878
19	5 : 3	1.6826
20	5 : 4	5.9568
Rata-rata		4.1766

Dari tabel diatas didapatkan nilai EAR rata-rata 4.1766%, maka perbandingan gelombang uji yang mendekati nilai tersebut adalah 2 : 4. Sehingga gelombang referensi yang digunakan berdasarkan persamaan 2.4 adalah $F_i^{(1)}$ yaitu gelombang uji 2.

4.5.2 Hasil Tes Surja Pada Trafo

Pada pengujian ini dilakukan 5 kali untuk setiap variasi *fault*. Bentuk gelombang yang dihasilkan didapatkan bahwa semakin besar nilai presentase *fault*, gelombang yang terbentuk semakin pendek. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.11. untuk gelombang surja pada trafo belitan primer, sedangkan pada belitan sekunder dapat dilihat pada Gambar 4.12.

Sedangkan nilai EAR yang dihasilkan sesuai banyaknya variasi seperti pada Tabel 4.4 dapat dilihat pada Gambar 4.13 untuk belitan primer, dan Gambar 4.14 untuk belitan sekunder. Nilai EAR yang dihasilkan akan dianggap *fault*, apabila melebihi angka 15%. Dalam penentuan standar ini menggunakan metode EAR *Test-Ref Manufacturing* seperti pada Tabel 2.2. Terlihat bahwa semakin besar presentase *fault*, maka nilai EAR yang dihasilkan juga semakin besar. Untuk EAR maksimum, rata-rata, dan minimum yang dihasilkan oleh variasi 1 dapat dilihat pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16.

Presentase *fault* juga akan mempengaruhi pendeknya gelombang, sehingga *zero crossing* yang terbentuk juga akan semakin cepat. Pada Gambar 4.17 dan Gambar 4.18 terlihat jelas pada saat gelombang ke 3/2 *cycle* bahwa nilai *zero crossing* akan turun.

Pencarian *zero crossing* menggunakan rumus matematika persamaan garis. Hal ini dikarenakan frekuensi sampling dari NI-9223 sebesar

1MHz, sehingga akan sulit untuk mencari waktu (μs) saat tegangan menyentuh angka nol. Persamaan garis dapat dilihat pada persamaan 4.1.

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (4.1)$$

Contoh: gelombang yang didapat adalah antara 4.47408V - -0.444916V , dengan waktu antara 163 μs - 164 μs , maka zero crossing yang didapat adalah 163.9096 μs , sesuai perhitungan dibawah ini:

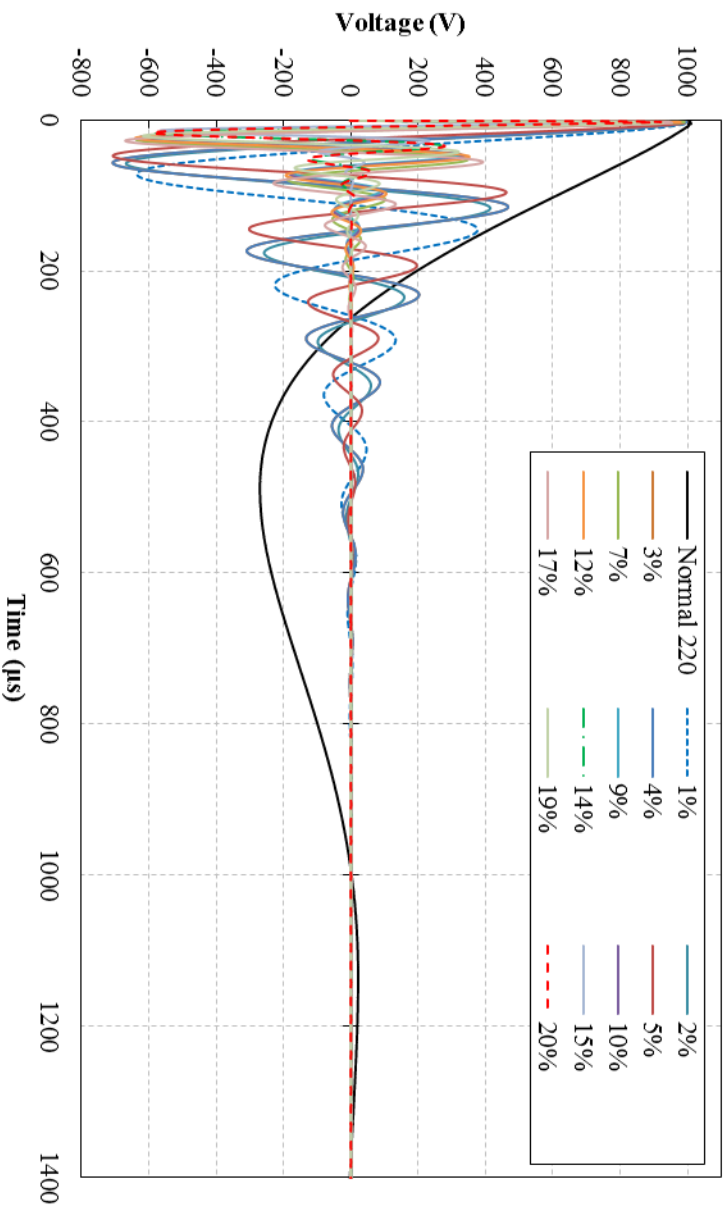
$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

$$\frac{y - 4.47408}{(-0.444916) - 4.47408} = \frac{x - 163}{164 - 163}$$

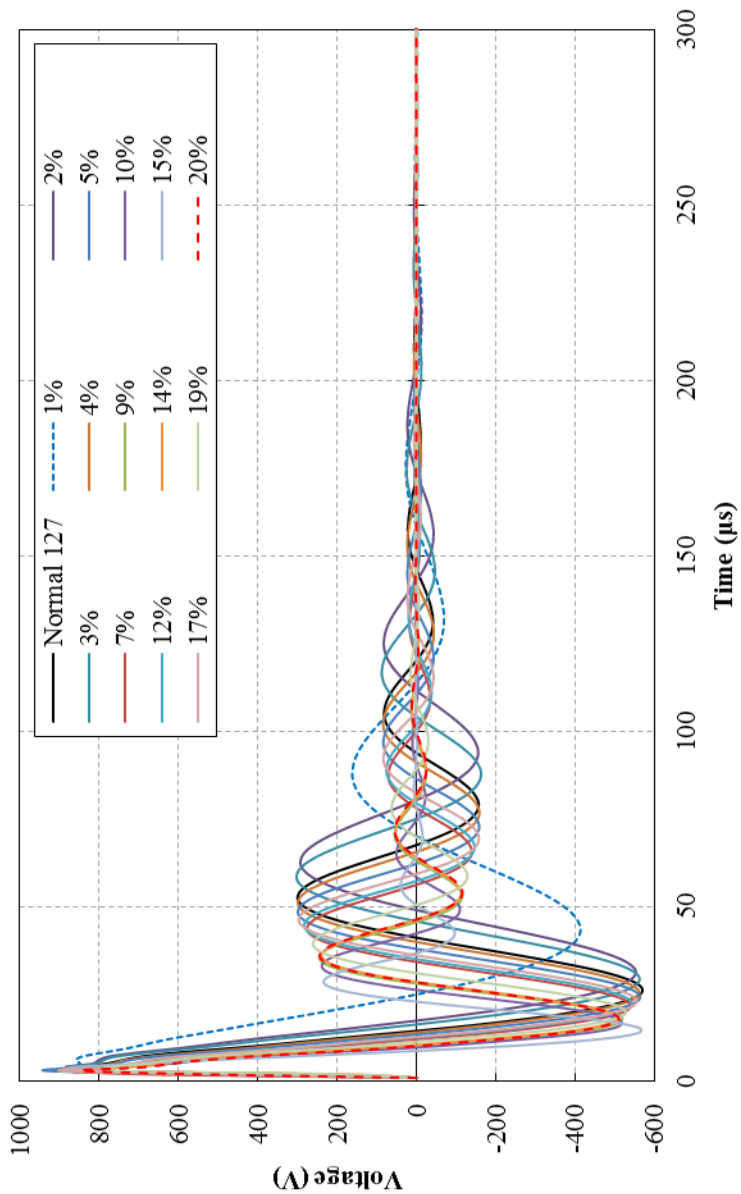
$$x = \frac{y - 4.47408}{(-0.444916) - 4.47408} + 163$$

$$y = 0 \rightarrow x = \frac{0 - 4.47408}{(-0.444916) - 4.47408} + 163$$

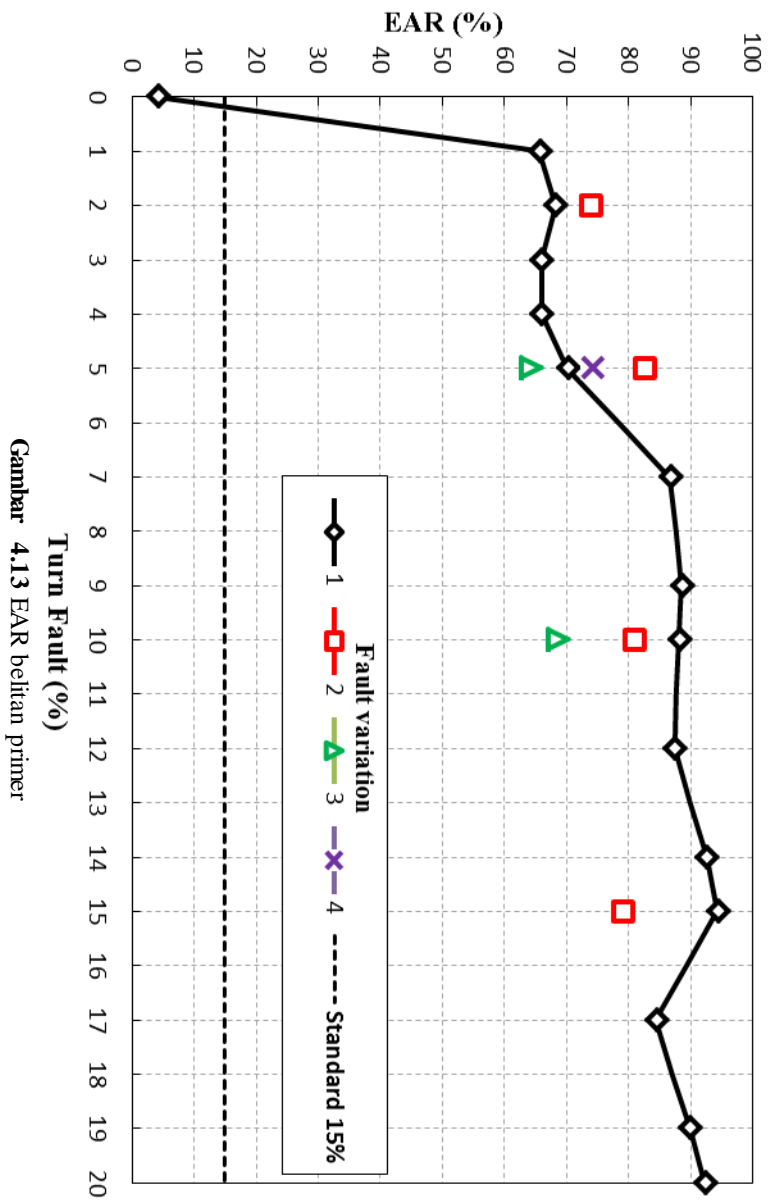
$$x = 163.9096$$



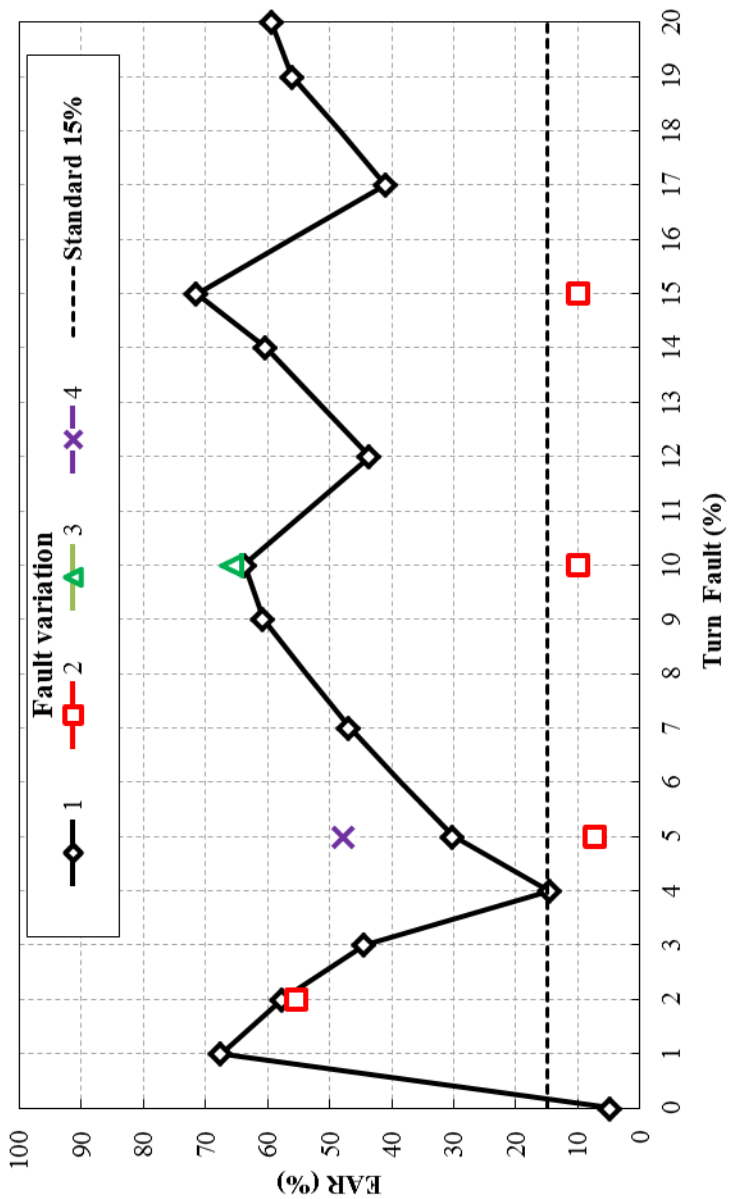
Gambar 4.11 Gelombang surja belitan primer



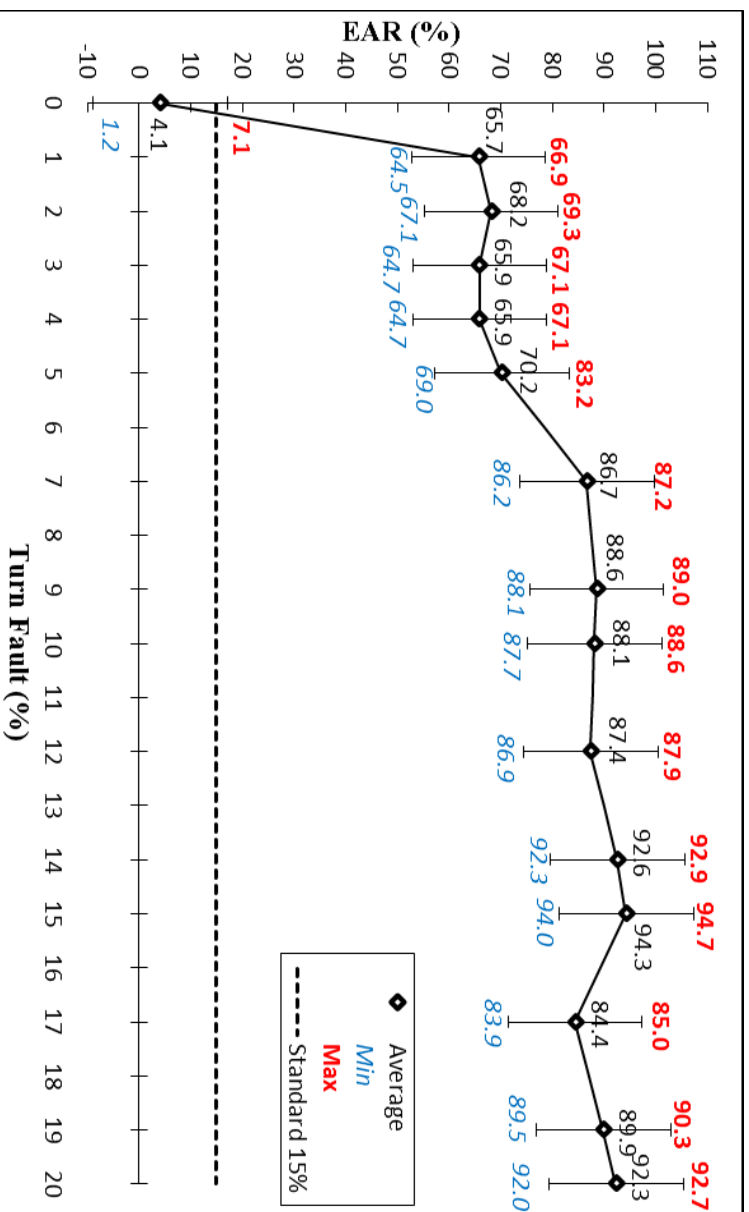
Gambar 4.12 Gelombang surja belitan sekunder



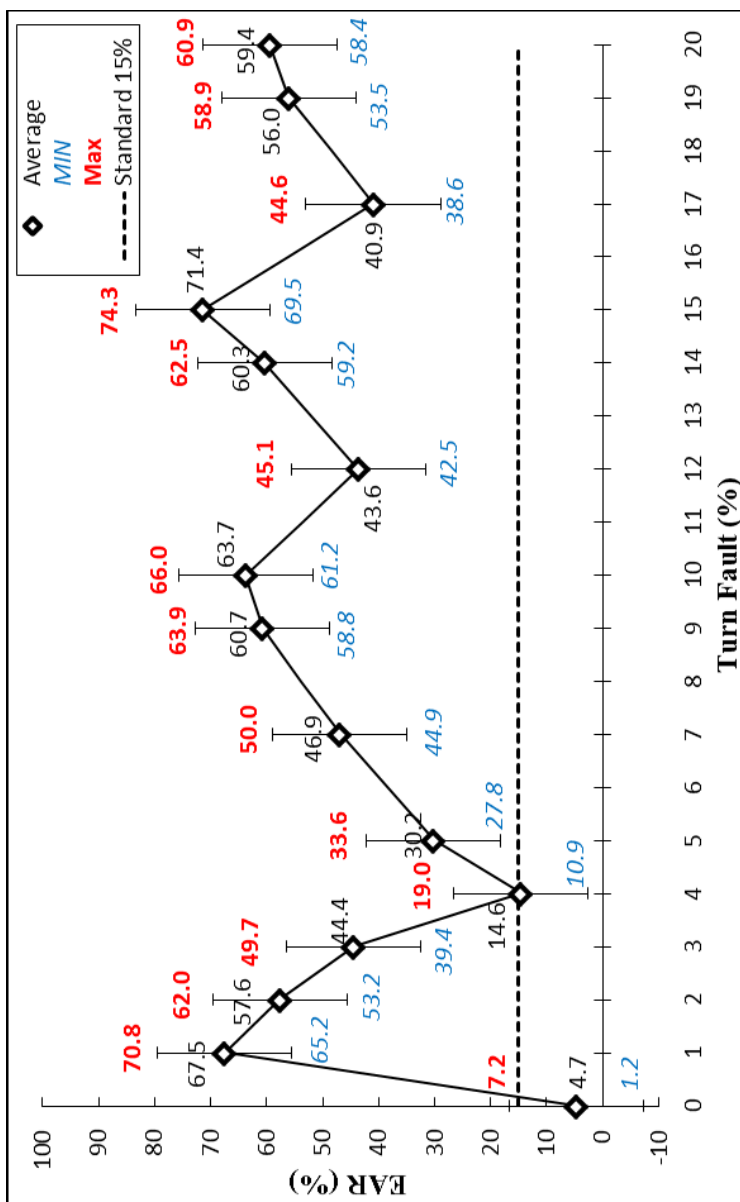
Gambar 4.13 EAR belian primer



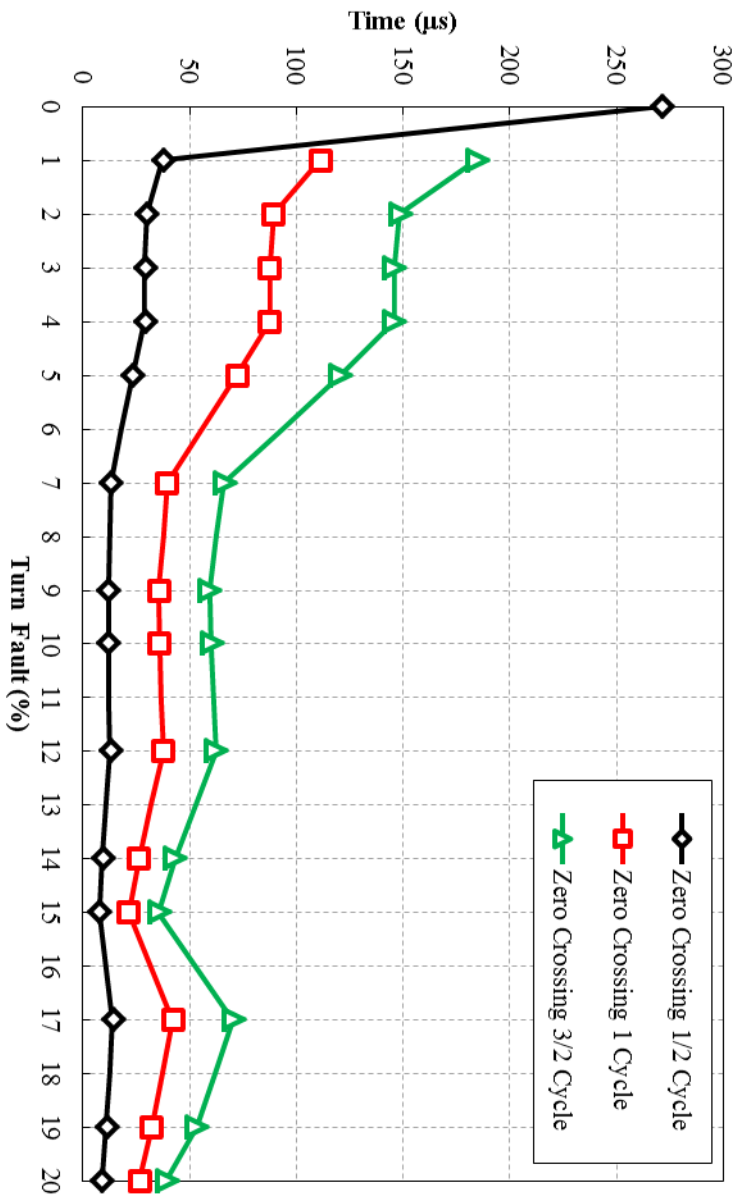
Gambar 4.14 EAR belitan sekunder



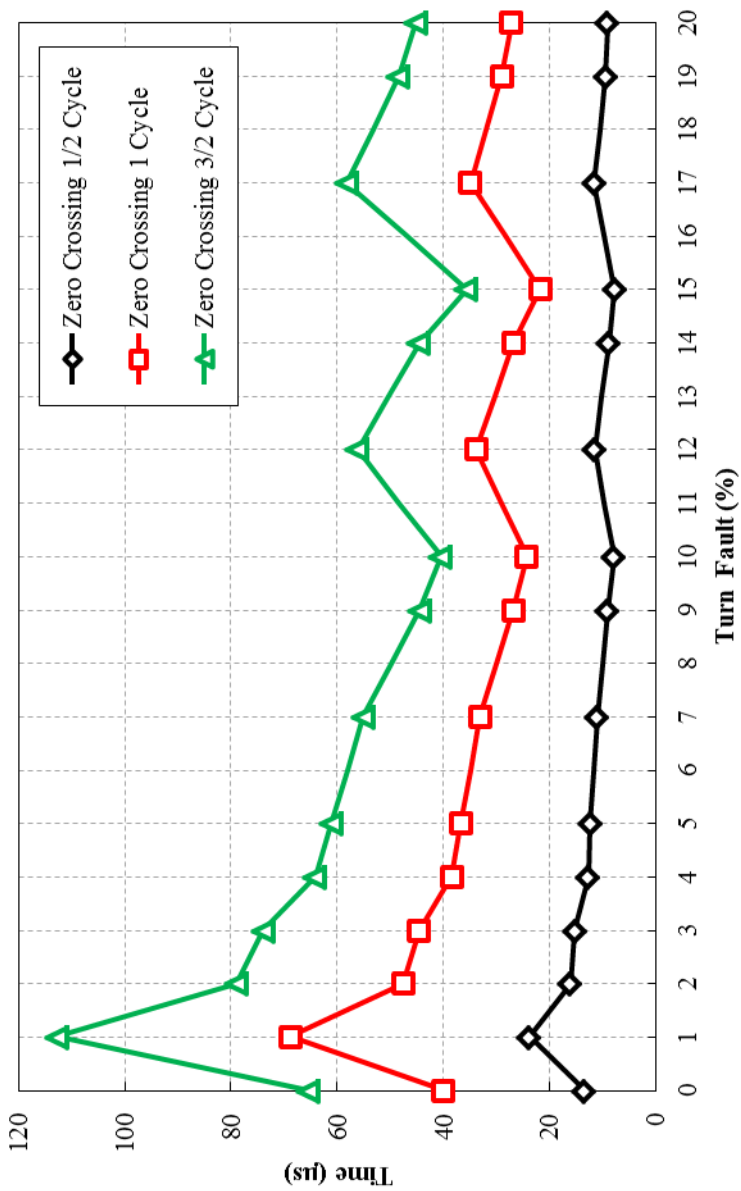
Gambar 4.15 Variasi I EAR beitan primer



Gambar 4.16 Variasi 1 EAR belitan sekunder



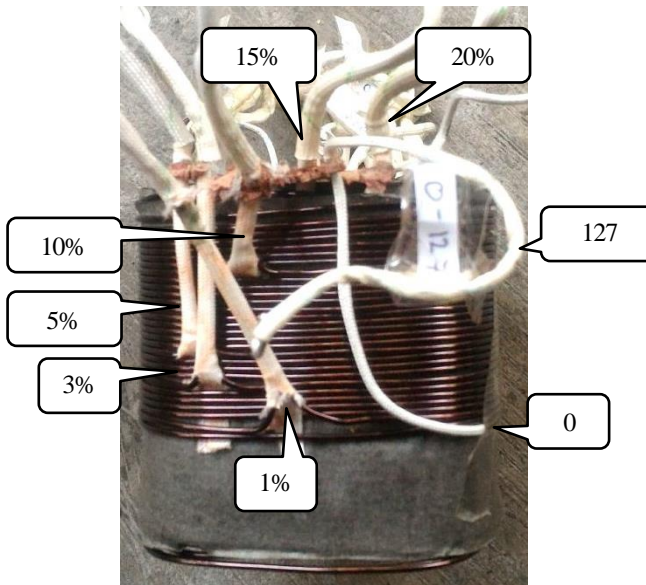
Gambar 4.17 Zero crossing belitan primer



Gambar 4.18 Zero crossing belitan sekunder

4.6 Pembongkaran Kembali Trafo

Karena metode EAR merupakan metode yang paling efektif untuk menganalisa perbedaan gelombang surja, maka untuk memastikan nomor belitan pada penelitian ini dilakukan pembongkaran kembali trafo dan melakukan pengukuran terhadap nilai resistansi dan induktansinya. Berikut adalah kumparan trafo yang setelah dibongkar dapat dilihat pada Gambar 4.19.

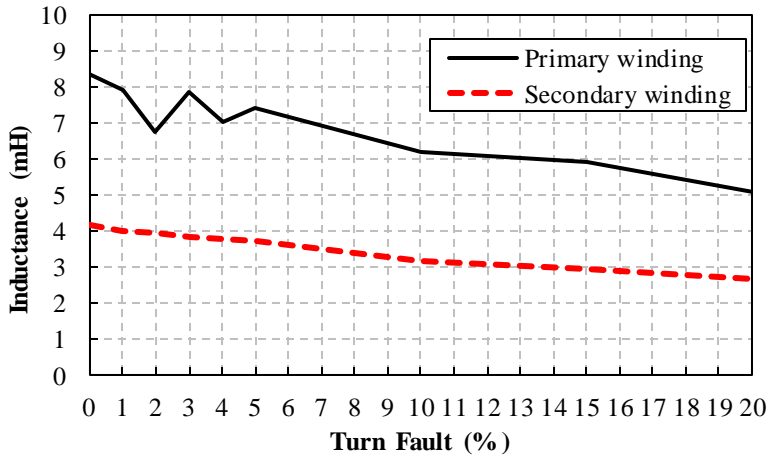


Gambar 4.19 Belitan trafo sekunder

Dari Gambar 4.18 tersebut, terlihat bahwa *external tab* 1% sudah dikeluarkan pada nomor belitan 2, *external tab* 3% pada belitan nomor 7, *external tab* 5% pada belitan nomor 11, dan seterusnya sesuai Tabel 3.4. Begitu pula dengan kumparan primer. Dari pembongkaran trafo ini dapat disimpulkan bahwa desain belitan trafo sudah sesuai dengan yang diinginkan.

Pengukuran resistansi dan reaktansi trafo dilakukan dengan menggunakan LCR. Hasil pengukuran tersebut menunjukkan bahwa nilai induktansi cenderung terhadap presentase *turn fault* yang diberikan, namun nilai turunnya tidak signifikan seperti pada saat belum

dibongkar seperti pada Gambar 4.2, untuk hasil pengukuran induktansi i dapat dilihat pada Gambar 4.20. Sedangkan untuk hasil pengukuran resistansi tidak dapat diketahui, karena LCR yang digunakan menunjukkan nilai resistansi yang terus berubah dan tidak pernah stabil.



Gambar 4.20 Induktansi trafo setelah dibongkar

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini dilakukan pembangkitan tegangan tinggi DC menggunakan rangkaian *single secondary winding villard cascade* untuk mengisi muatan kapasitor surja melalui *switch reed relay*, sedangkan untuk melepas muatannya ke belitan trafo menggunakan *switch IGBT* yang menghasilkan gelombang surja tanpa *noise* sehingga layak untuk dianalisa menggunakan metode *Error Area Ratio* (EAR). Hasil yang didapat setelah melakukan analisa EAR terhadap belitan trafo sebagai berikut :

1. Nilai EAR yang dihasilkan dengan berbagai variasi *turn fault*, menunjukkan bahwa kenaikan presentase *turn fault* menyebabkan kenaikan EAR, namun tidak linier.
2. Dari data EAR pada kedua belitan, maka trafo dalam kondisi normal memiliki nilai EAR berkisar dari 1.2 – 7.2%. Sedangkan apabila terjadi *turn fault* sebesar 1%, maka nilai EAR akan naik mulai dari 64.5 – 70.8%. Sehingga akan mudah unruk membedakan antara trafo dalam kondisi normal dan *fault*.
3. Nilai *zero crossing* juga akan turun terhadap kenaikan presentase *turn fault* namun tidak linear.
4. *Zero crossing 1/2 cycle* pada keadaan normal di belitan primer berada pada 271.5796 μ s, dan pada sekunder berada pada 13.4 μ s. Untuk belitan primer, *zero crossing* cenderung turun saat terjadi *turn fault*. Namun saat terjadi *turn fault* 1% pada belitan sekunder, *zero crossing* naik menjadi 23.8 μ s, kemudian cenderung turun untuk *turn fault* berikutnya.
5. Nilai EAR yang langsung naik saat diuji surja dengan presentase *fault* 1%, diindikasikan karena adanya fluks sisa pada trafo yang belum sepenuhnya hilang. Sehingga perlu dilakukan dimagnetisasi pada trafo sebelum diuji surja kembali.

5.2 Saran

Pada penelitian ini masih menggunakan trafo berjenis *dry transformer*. Dimungkinkan bentuk gelombang normal surja memiliki perbedaan pada jenis trafo yang memiliki bentuk *core* yang berbeda.

Sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memastikan karakteristik dari gelombang surja yang akan terbentuk.

Untuk membangkitkan gelombang surja yang lebih besar dan tanpa *noise*, diperlukan *switch* elektronik seperti *switch* IGBT bertegangan tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. H. Bartley, "An Analysis of International Transformer Failure Part 1," 2013.
- [2] M. A. Cash and T. G. Habetler, "Insulation Failure Prediction in AC Machines Using Line-Neutral Voltages," *IEEE*, vol. 34, Dec. 1998.
- [3] *A Stitch in Time*. Megger, 2006.
- [4] B. Adamczyk, F. Marek, and M. Swiatkowski, "Effect of Shielding on Surge Overvoltages in Multilayer type Winding of Power Transformer," *3 June 2016*, vol. 23.
- [5] A. Pretto, "Coil Testing in a Manufacturing Environment." International Electro-Magnetics, Inc., 2009.
- [6] "Unit 14 Transformers Washington State University," .
- [7] "Factors Affecting Inductance." <URL :<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-15/factors-affecting-inductance/>>, 04-Jun-2017.
- [8] S. T. Jan, R. Afzal, and A. Z. Khan, "Transformer Failure, Cause & Impact," *Int. Conf. Data Min. Civ. Mech. Eng. ICDMCME*, Feb. 2015.
- [9] Siswanto, "Transformer Turn Ratio (TTR) Testing." .<URL : <http://cr4.globalspec.com/thread/49397/Transformer-Turn-Ratio-TTR-Testing>>, 19 Januari 2010
- [10] J. Wilson, "Current State of Surge Testing Induction Machine," *Bak. Instrum. Co.*, Jun. 2003.
- [11] "AWA Surge test pass/fail criteria," *SKF*.
- [12] W. J. Nugroho, "Desain peralatan penguji isolasi belitan motor induksi menggunakan gelombang surja dan metode error area ratio," *Inst. Teknol. Sepuluh Nop.*, 2015.
- [13] *Specification Sheets for Verivolt Ultra-Compact, High-Bandwidth, Differential Voltage Sensor*. Entube DE-HB-S.
- [14] *Concise Technical Guide to Reed Relays*. Pickering Electronics.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

LAMPIRAN A

LISTING PROGRAM

1. Program Arduino

```
int pin_out = 13;
int pin_out2 = 12;
//12 ke relay, 13 ke IGBT
void setup()
{
    // put your setup code here, to run once:
    Serial.begin(9600);
    pinMode(pin_out,OUTPUT);
    pinMode(pin_out2,OUTPUT);
    Serial.println("pilih saklar");
    Serial.println("1. saklar 1 ");
    Serial.println("2. saklar 2 ");
}

void lcd()
{
    Serial.println("pilih saklar");
    Serial.println("1. saklar 1 ");
    Serial.println("2. saklar 2 ");
}

void loop()
{
    unsigned int data;
    int coba;
    if(Serial.available(>0)
    {
        data=Serial.read();
        if(data==52)//4
        {
            Serial.println("saklar 2 on.....");
            digitalWrite(pin_out2,HIGH);
            delay(5000);
            digitalWrite(pin_out2,LOW);
            delay(1);
        }
    }
}
```

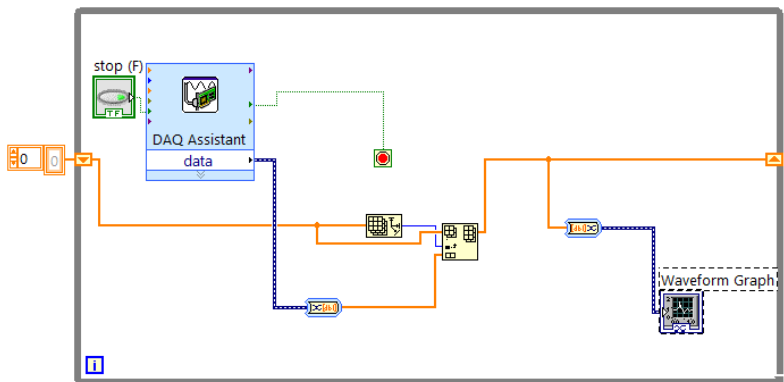
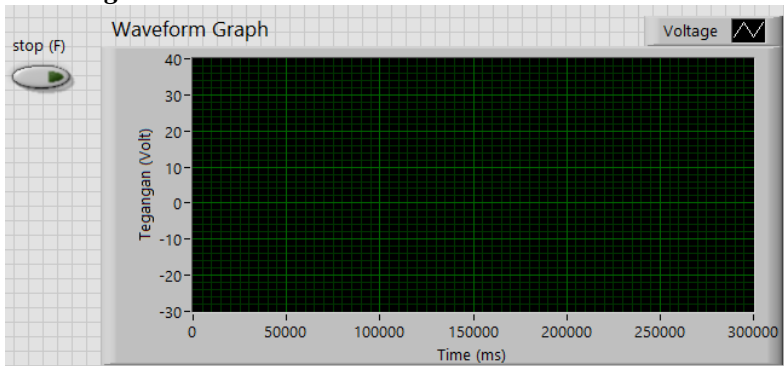


```

digitalWrite(pin_out,HIGH);
Serial.println("saklar 2 off.....");
delay(3000);
digitalWrite(pin_out,LOW);
Serial.println("saklar 1 off.....");
lcd();
}
}
// put your main code here, to run repeatedly:
}

```

2. Program LabVIEW



LAMPIRAN B DATASHEET

1. Datasheet reed relay

Contact		Units	Conditions	10kV Form A			10kV Form B			15kV Form A		
Contact Materials				Rhodium	Tungsten		Rhodium	Tungsten		Tungsten		
Isolation Across Contacts	kV		DC or AC peak	10	10		10	10		15		
Max. Switching Power	W			50	50		50	50		50		
Max. Switching Voltage	V		DC or AC peak	1000	7000		1000	7000		10000		
Max. Switching Current	A		DC or AC peak	3	2		3	2		2		
Max. Current Carry	A		DC or AC peak	4	3		4	3		2		
Capacitance Across Contacts	pF		Coil/Screen Grounded	<0.2	<0.2		<0.2	<0.2		<0.2		
Lifetime	Operations		Dry Switching	10 ⁹	10 ⁹		10 ⁹	10 ⁹		10 ⁹		
Lifetime	Operations		50W Switching	10 ⁶	10 ⁶		10 ⁶	10 ⁶		10 ⁸		
Contact Resistance	mOhms		Maximum (Typical)	50 (15)	250 (100)		50 (15)	250 (100)		250 (100)		
Insulation Resistance	Ohms		Minimum (Typical)	10 ¹⁰ (10 ¹³)	10 ¹⁰ (10 ¹³)		10 ¹⁰ (10 ¹³)	10 ¹⁰ (10 ¹³)		10 ¹⁰ (10 ¹³)		
Coil at 20°C				5V	12V	24V	5V	12V	24V	5V	12V	24V
Must Operate	V		DC	3.7	9	20	3.7	9	20	3.7	9	20
Must Release	V		DC	0.5	1.25	4	0.5	1.25	4	0.5	1.25	4
Operate Time	ms		Diode Fitted	3.0	3.0	3.0	2.0	2.0	2.0	3.0	3.0	3.0
Release Time	ms		Diode Fitted	2.0	2.0	2.0	3.0	3.0	3.0	2.0	2.0	2.0
Resistance	Ohms			28	150	780	38	240	925	16	95	350
Construction												
Isolation Contact to Coil	kV		DC or AC peak	17			17			17		
Insulation Resistance Contact												
to All Other Terminals	Ohms		Minimum (Typical)	10 ¹⁰ (10 ¹³)			10 ¹⁰ (10 ¹³)			10 ¹⁰ (10 ¹³)		
Environmental												
Operating Temperature Range	°C			-20 to +70			-20 to +70			-20 to +70		
Weight	Version		Standard	Panel			Spade			Flying Lead		
	Form A	gm	23	28			29			38		
	Form B	gm	31	36			37			46		

2. Datasheet IGBT

International
IOR Rectifier

PD-95913

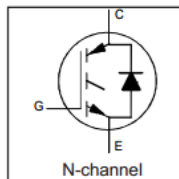
IRGPS60B120KDP

INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR WITH
ULTRAFAST SOFT RECOVERY DIODE

Motor Control Co-Pack IGBT

Features

- Low VCE (on) Non Punch Through IGBT Technology.
- Low Diode VF.
- 10µs Short Circuit Capability.
- Square RBSOA.
- Ultrasoft Diode Reverse Recovery Characteristics.
- Positive VCE (on) Temperature Coefficient.
- Super-247 Package.
- Lead-Free



$V_{CES} = 1200V$
 $V_{CE(on)} \text{ typ.} = 2.50V$
 @ $V_{GE} = 15V$,
 $I_{CE} = 60A$, $T_J = 25^\circ C$

Benefits

- Benchmark Efficiency for Motor Control.
- Rugged Transient Performance.
- Low EMI.
- Significantly Less Snubber Required
- Excellent Current Sharing in Parallel Operation.



Absolute Maximum Ratings

Parameter	Max.	Units
V_{CES}	1200	V
$I_C @ T_C = 25^\circ C$	105	A
$I_C @ T_C = 100^\circ C$	60	A
I_{CM}	240	A
I_{LM}	240	A
$I_F @ T_C = 25^\circ C$	120	A
$I_F @ T_C = 100^\circ C$	60	A
I_{FM}	240	A
V_{GE}	± 20	V
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	595	W
$P_D @ T_C = 100^\circ C$	238	W
T_J	-55 to +150	°C
T_{STG}		°C
Soldering Temperature, for 10 sec.		300 (0.063 in. (1.6mm) from case)

RIWAYAT HIDUP



Muhammad Infaq Dahlan dilahirkan di Jombang, 31 Mei 1994. Penulis memulai jenjang pendidikan Sekolah Dasar di MI-Ainul Ulum 2 Karobelah dari tahun 2000-2006. Setelah itu penulis melanjutkan studinya di SMP Negeri 3 Mojoagung dan lulus pada tahun 2009. Selanjutnya penulis diterima sebagai murid SMA Negeri Mojoagung. Pada tahun 2012, penulis melanjutkan jenjang pendidikan di Perguruan Tinggi di Jurusan D3 Teknik Elektro Program Studi Elektro Industri di ITS Surabaya hingga lulus pada tahun 2015. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan Program Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui program Lintas Jalur tahun 2015 dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga.

Halaman ini sengaja dikosongkan